RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

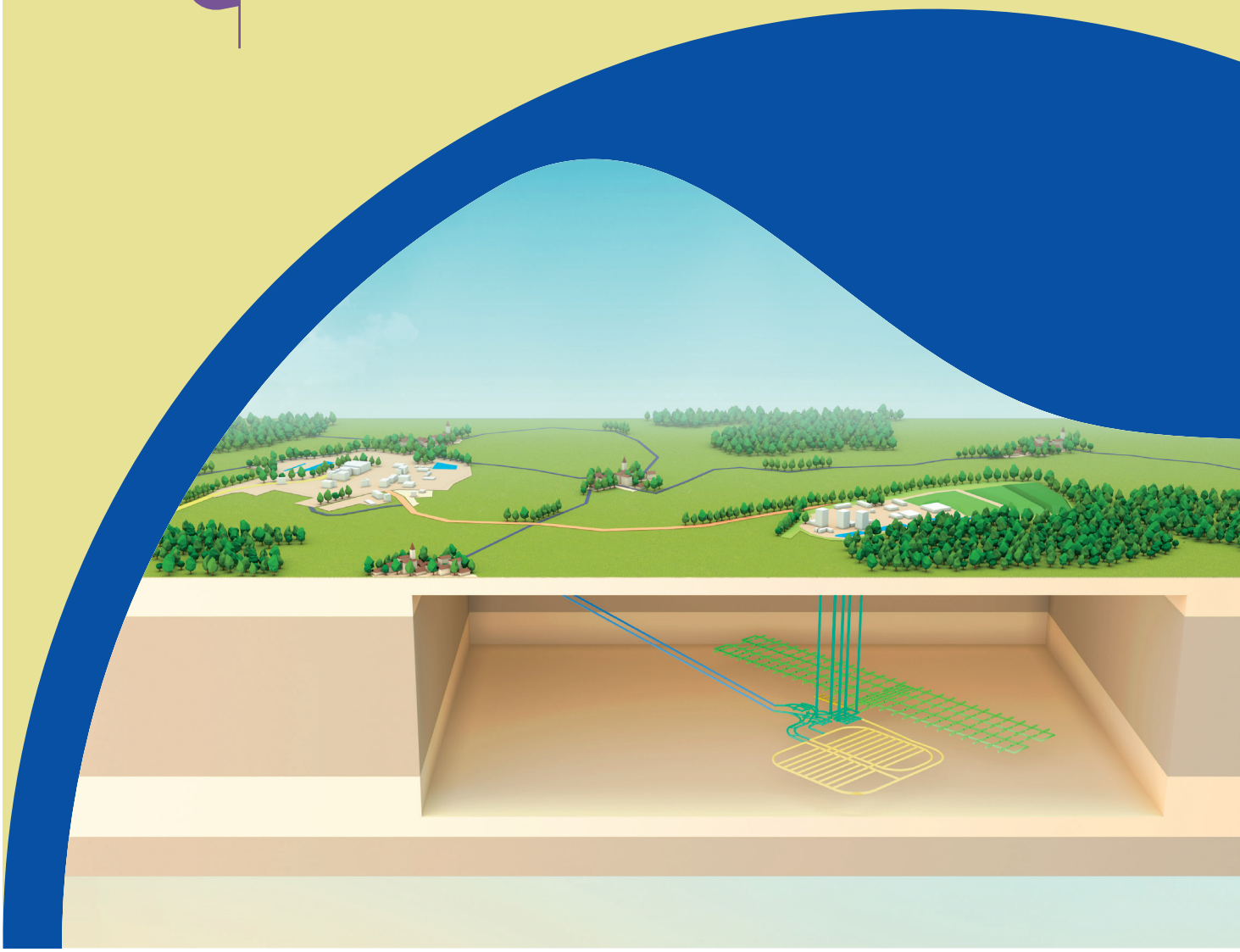
ANDRA

2026

DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION
DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE (INB) CIGÉO

PIÈCE 20

Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo



MISE À JOUR DU DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION POUR ENQUÊTE PUBLIQUE

À la suite de l'instruction technique par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection et des consultations réglementaires, et avant son passage en enquête publique, des mises à jour ont été apportées par l'Andra dans certaines pièces du dossier (déposé initialement le 16 janvier 2023).

Pour la clarté de l'information, l'Andra assure la traçabilité de ces mises à jour via les moyens suivants :

- des barres grises en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts en amont des consultations réglementaires ;
- un surlignage gris pour tracer les modifications ou ajouts depuis les consultations réglementaires ;
- des tableaux de traçabilité de ces mises à jour.

Les corrections mineures (orthographiques, de forme ou d'imprécision) ne sont pas matérialisées.

Sommaire

1. Le contexte et l'objet de la pièce 9

1.1 Le plan de développement et les itérations de sûreté/conception/connaissances 10

1.2 Le plan de développement et sa place dans le dossier de demande d'autorisation de création 13

1.3 L'objet et le périmètre du plan de développement de l'installation de stockage Cigéo 15

1.4 Les démarches et stratégies support aux actions décrites dans le plan de développement 17

1.4.1 Le développement progressif des composants 18
1.4.2 La recherche et développement de demain 19
1.4.3 Les démonstrateurs et les ouvrages témoins 20
1.4.4 La démarche générale de qualification des éléments importants pour la protection (EIP) 21
1.4.5 La démarche générale de réalisation des essais pour l'autorisation de mise en service et des essais en actif après l'autorisation de mise en service 23
1.4.6 La maîtrise du processus d'acceptation des colis de déchets radioactifs 26
1.4.7 La stratégie de la surveillance 28

2. La préparation de la mise en service de l'installation nucléaire Cigéo (Phipil) 29

2.1 L'environnement de surface et le milieu géologique 32

2.1.1 Les spécificités de l'environnement de surface et de milieux géologique 32
2.1.2 L'environnement de surface 37
2.1.3 Les Calcaires du Barrois 38
2.1.4 Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien 40
2.1.5 La couche du Callovo-Oxfordien 42

2.2 Les colis de déchets radioactifs 53

2.2.1 Le socle de connaissances des colis de déchets radioactifs 53
2.2.2 Les colis de déchets radioactifs du quartier pilote HA et de la tranche 1 du quartier de stockage MA-VL 54
2.2.3 Les conteneurs de stockage HA et MA-VL et les paniers de stockage MA-VL 58

2.3 Les installations de surface 65

2.3.1 Une conception anticipée 65
2.3.2 Les bâtiments de surface de l'installation nucléaire 68
2.3.3 Les verses 70

2.4 Les ouvrages de liaison 73

2.4.1 Les liaisons surface-fond 75
2.4.2 Les galeries de l'installation souterraine 77
2.4.3 La descente de béton, de fluide(s) ou de granulats par un forage vertical ou une canalisation en puits 83
2.4.4 La surveillance des ouvrages de liaison 84

2.5 Le process nucléaire 85

2.5.1 Le développement des composants clés du process nucléaire 85
2.5.2 Les composants du funiculaire 86
2.5.3 Les hottes MA-VL et leur système d'accostage 88
2.5.4 Le pont stockeur 90

2.5.5 Le robot bride et de mesures 93

2.6 Le quartier pilote HA 95

2.6.1 Un outil clé du développement progressif du quartier de stockage HA 95
2.6.2 La démarche progressive support à la construction et à la qualification du fonctionnement de l'alvéole HA 98
2.6.3 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances 106
2.6.4 L'intégration des avancées technologiques 114

2.7 Les quatre premiers alvéoles MA-VL 115

2.7.1 Une démarche adaptée à la mise en œuvre des quatre premiers alvéoles MA-VL équipés 115
2.7.2 La démarche progressive support à la construction des quatre premiers alvéoles MA-VL 117
2.7.3 La démarche progressive de qualification du fonctionnement des quatre premiers alvéoles MA-VL 121
2.7.4 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances 123
2.7.5 L'intégration des avancées technologiques 129

2.8 Le système de stockage en grand 130

2.8.1 La tenue aux séismes des ouvrages, des composants du process nucléaire et du Callovo-Oxfordien 131
2.8.2 Des développements de solutions pour réduire la quantité d'acier dans l'ensemble de l'installation souterraine 133
2.8.3 L'amélioration continue des dispositifs de surveillance et de leur mise en œuvre 134

2.9 L'organisation temporelle des actions 135

3. La préparation de la construction et les mises en service des installations et ouvrages (surface et souterrains) ultérieures 139

3.1 Les colis de déchets radioactifs 141

3.1.1 Une démarche continue d'amélioration des connaissances sur les colis de déchets 141
3.1.2 Les colis de déchets du quartier de stockage HA et des tranches ultérieures du quartier de stockage MA-VL (colis de déchets bitumés) 145
3.1.3 Les conteneurs de stockage HA et MA-VL 148
3.1.4 Le cas des déchets bitumés 148

3.2 Les installations de surface 152

3.2.1 L'ouvrage de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal (ETH) 152
3.2.2 Le bâtiment nucléaire de surface EP2 153

3.3 Le quartier de stockage HA 154

3.3.1 La démarche progressive de développement et de qualification de la réalisation et du fonctionnement du quartier de stockage HA 154
3.3.2 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances 156
3.3.3 Les optimisations et les évolutions possibles de concept du quartier de stockage HA 158

3.4 Les alvéoles MA-VL des tranches ultérieures 159

3.4.1 La démarche progressive de développement et de qualification de réalisation et de fonctionnement des nouveaux alvéoles MA-VL 159
3.4.2 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances 163

3.5 L'organisation temporelle prévisionnelle des actions 163

4. La préparation de la fermeture 167

4.1 La temporalité spécifique des ouvrages de fermeture 171
4.1.1 Une perspective de mise en œuvre des ouvrages de fermeture lointaine qui invite à ne pas figer aujourd'hui les solutions techniques 172
4.1.2 Des mesures conservatoires dès la phase de construction initiale qui n'obèrent pas les possibilités de réalisation future des ouvrages de fermeture 173
4.1.3 Des temps d'acquisition expérimentale longs qui invitent à anticiper les essais permettant de préparer la réalisation future 174
4.2 La logique de déroulement et la nature des activités 174
4.2.1 Le développement progressif de la construction et du fonctionnement des ouvrages de fermeture 175
4.2.2 Conforter la démonstration sûreté et l'atteinte des performances visées 183
4.2.3 La veille et l'intégration des avancées scientifiques et technologiques 189
4.3 L'organisation temporelle des actions 190

5. L'anticipation de potentielles évolutions d'inventaire des déchets 193

Annexes 197

Annexe 1 Les expérimentations au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne 198

Tableau de traçabilité des principales évolutions 199

Tables des illustrations 203

Références bibliographiques 207

Préambule

Le plan de développement de l'installation de stockage (PDIS) Cigéo est une des pièces du dossier de demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo. Elle n'est pas appelée par le code de l'environnement et son origine se trouve dans la démarche itérative d'élaboration de la conception et de la démonstration de sûreté associée, notamment à l'issue de l'instruction du dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra à l'ASN en 2016. Plus précisément, le PDIS fait suite à l'avis n°2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et au courrier du 12 janvier 2018 (1) dans lesquels l'ASN s'exprime sur le niveau de détail attendu pour la demande d'autorisation de création en matière de démonstration de sûreté. Le PDIS répond également à la recommandation R14 de l'avis de l'Autorité environnementale sur le centre de stockage Cigéo, émise dans le cadre du dossier de demande de déclaration d'utilité publique (DUP), déposé par l'Andra en août 2020.

La version préliminaire du rapport de sûreté, à laquelle est associée l'étude de maîtrise des risques[1], présente la démonstration de la sûreté en fonctionnement et après fermeture de l'INB Cigéo, conçue pour stocker les déchets prévus dans l'inventaire de référence. L'INB Cigéo étant une installation qui se développera de façon progressive sur une durée d'ordre séculaire, la présente demande d'autorisation de création présente un niveau de définition plus détaillé pour les premiers ouvrages exploités, appelés « tranche 1 », par rapport aux autres phases de développement.

Le PDIS s'appuie en particulier sur les stratégies retenues pour le développement de l'installation nucléaire, le déploiement des mises en services successives et la fermeture proposés dans la pièce 16 « Plan directeur de l'exploitation » (2).

Le PDIS présente de façon documentée la feuille de route des activités de type ingénierie et des activités scientifiques et technologiques (études et recherche) de l'Andra en support aux prochaines grandes étapes de développement après le dépôt du dossier de DAC, jusqu'à la fermeture définitive de l'INB Cigéo.

Ce document technique et programmatique présente, dans une logique de développement détaillé et d'amélioration continue, les études et essais prévus après le dépôt du dossier de DAC. Il couvre donc à la fois des aspects classiques du développement d'une installation nucléaire jusqu'à sa mise en service (qualification par exemple) et des aspects spécifiques au développement progressif de l'INB Cigéo.

Les études et essais décrits dans le PDIS seront réalisés en soutien au développement technique de l'INB Cigéo, à sa construction et à son fonctionnement progressif, puis en soutien à la logique de sa fermeture. Les résultats de ces études et essais seront intégrés en particulier aux réexamens de la démonstration de la sûreté de l'installation, en lien avec les jalons d'autorisation successifs prévus par la réglementation.

Le PDIS présente ainsi un ensemble d'études et d'essais, dont le niveau de détail est proportionné aux enjeux associés et aux échéances à plus ou moins long terme.

[1] Selon l'article 5-593-19 « L'étude de maîtrise des risques mentionnée au 8° du I de l'article R. 593-16 présente, sous une forme appropriée pour accomplir les consultations locales mentionnées à l'article R. 593-21 et, le cas échéant, à l'article R. 593-22 ainsi que l'enquête publique prévue à l'article L. 593-8, l'inventaire des risques que présente l'installation projetée ainsi que l'analyse des dispositions prises pour prévenir ces risques et des mesures propres à limiter la probabilité des accidents et leurs effets tels qu'ils figurent dans la version préliminaire du rapport de sûreté. ».

Il s'agit :

- d'études et essais prévus en amont de la construction, en lien avec la réalisation opérationnelle initiale ;
- d'études et essais pendant la phase industrielle pilote, notamment jusqu'à la mise en service de la tranche 1, en lien notamment avec les éléments qui permettront de conforter la démonstration de sûreté ;
- d'études et essais en lien avec les optimisations de conception envisagées pour les mises en service ultérieures d'alvéoles du quartier de stockage MA-VL ;
- d'études et essais en lien avec les optimisations de conception envisagées pour les mises en service d'alvéoles du quartier de stockage HA à l'horizon 2070-2080 ;
- d'études et essais en lien avec l'approche envisagée pour la fermeture de l'installation ;
- d'études et essais en lien avec les enjeux sur la flexibilité (cas des bitumes notamment) et sur l'adaptabilité.

Les résultats des études et essais, acquis au fil du développement du stockage, dès l'engagement de sa construction, permettront, sur la base d'un retour d'expérience permanent, de conforter la démonstration de sûreté et la conception des tranches à réaliser (et à autoriser) ultérieurement.

Le PDIS sera mis à jour régulièrement, en lien avec :

- les jalons décisionnels (décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire, mise en service de l'installation nucléaire pendant la phase industrielle pilote (Phipil), etc.) ;
- le retour d'expérience pendant le déploiement progressif de l'installation nucléaire de base Cigéo (le retour d'expérience du fonctionnement et de la surveillance du quartier pilote HA et des quatre premiers alvéoles MA-VL, etc.) ;
- les avancées technologiques (le retour d'expérience des essais au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, le retour d'expérience des démonstrateurs, les avancées sur la conception des ouvrages de fermeture, les avancées sur les études relatives aux colis de déchets bitumés menées par l'Andra et les producteurs, etc.).

Les possibles évolutions de la politique en matière de stratégie énergétique pourront également avoir une incidence et entraîner des évolutions dans les éditions successives du PDIS, en lien avec les processus d'autorisation requis.

UN PLAN DE DÉVELOPPEMENT QUI S'APPUIE SUR DES ACQUIS ET S'ADAPTE AUX PHASES TEMPORELLES DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE CIGÉO ET À LA RÉVERSIBILITÉ

Le présent plan de développement se fonde sur les acquis de connaissances scientifiques et technologiques, un niveau de description de l'installation nucléaire en lien avec son déploiement progressif et les enseignements de la démonstration de sûreté associée au stade de la demande d'autorisation de création.

Il rappelle les acquis de connaissance issus de plus de trente années d'études permettant de mettre en perspective les différents éléments techniques au regard de leurs enjeux (sûreté, etc.).

Il présente les études (consolidation de la connaissance scientifique et technologique, précision et optimisation de la conception, confortation de la sûreté) en regard des objectifs suivants :

- préparer la mise en service de l'INB Cigéo pendant la phase industrielle pilote ;
- préparer la mise en service des tranches ultérieures pour le stockage des déchets HA et MA-VL, dont la mise en service des alvéoles pour le stockage des colis de déchets bitumés et la décision au préalable de choix du mode de stockage retenu, en intégrant de possibles optimisations ;
- préparer la fermeture de l'installation souterraine (bien qu'elle soit lointaine) en réponse à l'objectif fondamental de protection de l'homme et l'environnement après fermeture à long terme.

1

Le contexte et l'objet de la pièce

1.1 Le plan de développement et les itérations de sûreté/conception/connaissances 10

1.2 Le plan de développement et sa place dans le dossier de demande d'autorisation de création 13

1.3 L'objet et le périmètre du plan de développement de l'installation de stockage Cigéo 15

1.4 Les démarches et stratégies support aux actions décrites dans le plan de développement 17

1.1 Le plan de développement et les itérations de sûreté/conception/connaissances

Compte tenu de la spécificité du stockage géologique profond et de son objectif de protection des personnes et l'environnement sur le long terme et de manière passive après fermeture, le développement progressif de l'INB Cigéo s'appuie sur un lien très étroit entre les trois piliers que sont la sûreté, la conception et les connaissances scientifiques et technologiques.

Chaque itération entre ces trois piliers vise un objectif d'orientation des choix de conception de l'installation de stockage et, plus généralement, l'ensemble des études et recherches, de manière à accroître la robustesse de l'installation en prenant en compte l'avancée progressive des connaissances scientifiques et technologiques et les objectifs de sûreté qui lui sont conférés.

Ces itérations sont menées à chaque jalon de développement de l'INB. Mises en place dès le démarrage du programme d'études et de recherches sur le stockage géologique après la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (3) pour intégrer la sûreté dès les phases amont (4) ; elles ont été réalisées lors des précédentes étapes du développement progressif du projet de stockage : dossier de faisabilité de principe du stockage géologique, définition des options initiales de conception, autorisation d'installation et d'exploitation du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, préparation et démonstration de la faisabilité scientifique et technique du stockage et des premières options de conception et de sûreté associées, choix du site d'implantation, et options de sûreté.

Pour chaque itération, l'Andra s'est attachée à montrer les acquis scientifiques et technologiques, à préciser la conception et à apporter les éléments de vérification du respect des objectifs de sûreté et de protection fixés. L'Andra a aussi visé à retenir les meilleures techniques disponibles. En complément, l'Andra s'est systématiquement attachée à présenter les enseignements (acquis et axes d'amélioration continue) en regard des enjeux vis-à-vis du jalon suivant.

Chaque itération a conduit à une évaluation de la sûreté (en phases de fonctionnement et à long terme après fermeture) qui s'est traduite par l'élaboration d'un dossier émis par l'Andra ayant fait l'objet d'une instruction systématique menée par l'ASN et parfois d'une revue par des experts au niveau international.

Ainsi, à titre illustratif, conformément à la réglementation (cf. Article R.593-14 du code de l'environnement[2]), l'Andra a demandé à l'ASN en 2016 un avis sur les options de sûreté qui s'appuient sur un socle de connaissances scientifiques et technologiques acquis sur plus de vingt ans, des avancées de la conception dans le cadre du développement industriel du projet global Cigéo démarré en 2011 et son évaluation de sûreté associée.

À l'issue de cette instruction, l'ASN a rendu son avis le 11 janvier 2018 (5) dans lequel elle a mentionné : « *L'ASN estime que :*

a. *le projet a atteint globalement une maturité technologique satisfaisante au stade du dossier d'options de sûreté ;*
b. *le dossier d'options de sûreté est documenté et étayé et constitue une avancée significative par rapport aux dossiers « argile 2005 » et « jalon 2009 » ayant fait l'objet respectivement des avis de l'ASN du 1er février 2006 (6) et du 26 juillet 2011 susvisés (7). »*

---

[2] Selon l'article R. 593-14 du code de l'environnement, « *toute personne qui prévoit d'exploiter une installation nucléaire de base peut demander à l'Autorité de sûreté nucléaire, préalablement à l'engagement de la procédure d'autorisation de création, un avis sur tout ou partie des options qu'elle a retenues pour assurer la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1.*
L'autorité, par un avis rendu et publié dans les conditions et les formes qu'elle détermine, précise dans quelle mesure les options de sûreté présentées par le demandeur sont propres à prévenir ou limiter les risques pour les intérêts mentionnés à l'article L. 593-1, compte tenu des conditions techniques et économiques du moment. L'autorité peut définir les études et justifications complémentaires qui seraient nécessaires en vue d'une éventuelle demande d'autorisation de création. Elle peut fixer la durée de validité de son avis ».

L'ASN a adressé par ailleurs une lettre de suite à l'Andra (1) précisant ses attentes pour le dossier d'autorisation de création ainsi que vis-à-vis des particularités de l'installation nucléaire de base Cigéo, compte tenu d'une part du principe de réversibilité et du développement prévu de l'installation dont la progressivité des mises en service et, d'autre part, de la nécessité d'avoir des éléments complémentaires en vue de prises de décision.

La demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo s'inscrit dans cette continuité conformément à l'article R.593-16 du code de l'environnement. Elle constitue un jalon important qui s'appuie sur une boucle d'itération sûreté/conception/connaissances menée depuis le dossier d'options de sûreté, apportant d'une part les compléments prévus dans les options de sûreté et d'autre part les réponses aux demandes formulées par l'ASN à la suite de l'instruction de ces options.

Les itérations sûreté/conception/connaissances continueront au-delà du dépôt de la demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo, pour intégrer :

- les conclusions de l'instruction du dossier de demande d'autorisation de création, dont les demandes qui seront formulées par l'ASNR et les engagements à prendre par l'Andra vis-à-vis de compléments éventuels à apporter d'ici la mise en service[3] ;
- le retour d'expérience de la phase de construction initiale de l'INB Cigéo comprenant les résultats des reconnaissances détaillées en vue de l'implantation des installations/ouvrages en surface dans les zones de descenderie et puits (géologie, géotechnique, etc.) et de la reconnaissance à l'avancement de son exploitation ;
- le retour d'expérience des essais en vue de la mise en service, en particulier les essais de qualification ;
- des apports des activités scientifiques et technologiques dont en particulier :
  - ✓ les compléments de connaissances scientifiques et technologiques issus des programmes de recherche pilotés par l'Andra, notamment sur la géologie, la géodynamique, les matériaux, le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques, la géomécanique, les capteurs, l'environnement, etc. ;
  - ✓ les acquis de connaissances issus des programmes de recherche nationaux et internationaux, dont en particulier ceux pilotés ou co-pilotés par les homologues de l'Andra ou les producteurs ;
  - ✓ les compléments d'études de conception relatives à l'optimisation des solutions techniques proposées dans le dossier de demande d'autorisation de création, en lien avec le niveau de détail présenté pour les différentes phases de développement de l'installation et les avancées technologiques ;
  - ✓ les essais et les prototypes réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (LS) (*a minima* jusqu'à 2030 et au-delà sous réserve de l'autorisation de prolongation de son exploitation) ;
- les résultats issus de la réalisation de démonstrateurs, qui participent à l'apport d'éléments concernant notamment la démonstration de la constructibilité ou du fonctionnement de composants ;
- les compléments d'études de sûreté pour mettre à jour la démonstration de sûreté en vue de la mise en service complète de l'INB Cigéo, si le stockage se poursuit à l'issue de la phase industrielle pilote ;
- les compléments d'études de sûreté pour apporter la démonstration de sûreté, en cas de décision de stocker des colis issus de l'inventaire de réserve, en lien avec les processus d'autorisation requis.

[3] Le processus d'instruction technique par les autorités d'un dossier de demande d'autorisation de création (DAC) est un processus « classique » conformément à l'article L. 593-8 du code de l'environnement pour toute nouvelle INB. À l'issue des instructions, des demandes de l'ASNR et des engagements pris par l'exploitant de l'INB sont actés et ciblent globalement la mise en service. Dans certains cas, des compléments et rendez-vous peuvent être mentionnés avant le démarrage de la construction ou pendant la construction dans le cadre d'un processus de suivi par l'autorité de sûreté du développement de cette construction.

Les itérations sûreté/conception/connaissances favorisent l'intégration aux futures tranches[4] de constructions, des améliorations de toute nature (sûreté, technico-économiques, etc.) qui seront rendues possibles sur la durée d'ordre séculaire du projet par les progrès scientifiques et techniques, ainsi qu'en tirant parti du retour d'expérience acquis. Dès lors que, par rapport à une technologie envisagée précédemment, une meilleure solution technique aura été développée et aura atteint un degré de maturité suffisant pour pouvoir être intégrée à une prochaine tranche de construction, l'exploitant, sous réserve de son autorisation, l'implantera dans l'INB Cigéo.

Concernant la démonstration de sûreté, les connaissances scientifiques et technologiques acquises entre deux itérations successives contribuent à réduire les incertitudes résiduelles, pendant son fonctionnement et après sa fermeture, à préciser les hypothèses de sûreté retenues et à intégrer des améliorations de toute nature.

Par ailleurs, selon l'article R. 593-26 du code de l'environnement, à l'issue du processus d'instruction du dossier d'autorisation de création, le décret pourra établir « *la périodicité des réexamens mentionnés à l'article L. 593-18, si les particularités de l'installation justifient que cette périodicité ne soit pas égale à dix ans, et peut imposer l'intervention du premier réexamen de sûreté dans un délai particulier pour tenir compte des essais et des contrôles réalisés au début du fonctionnement de l'installation* ».

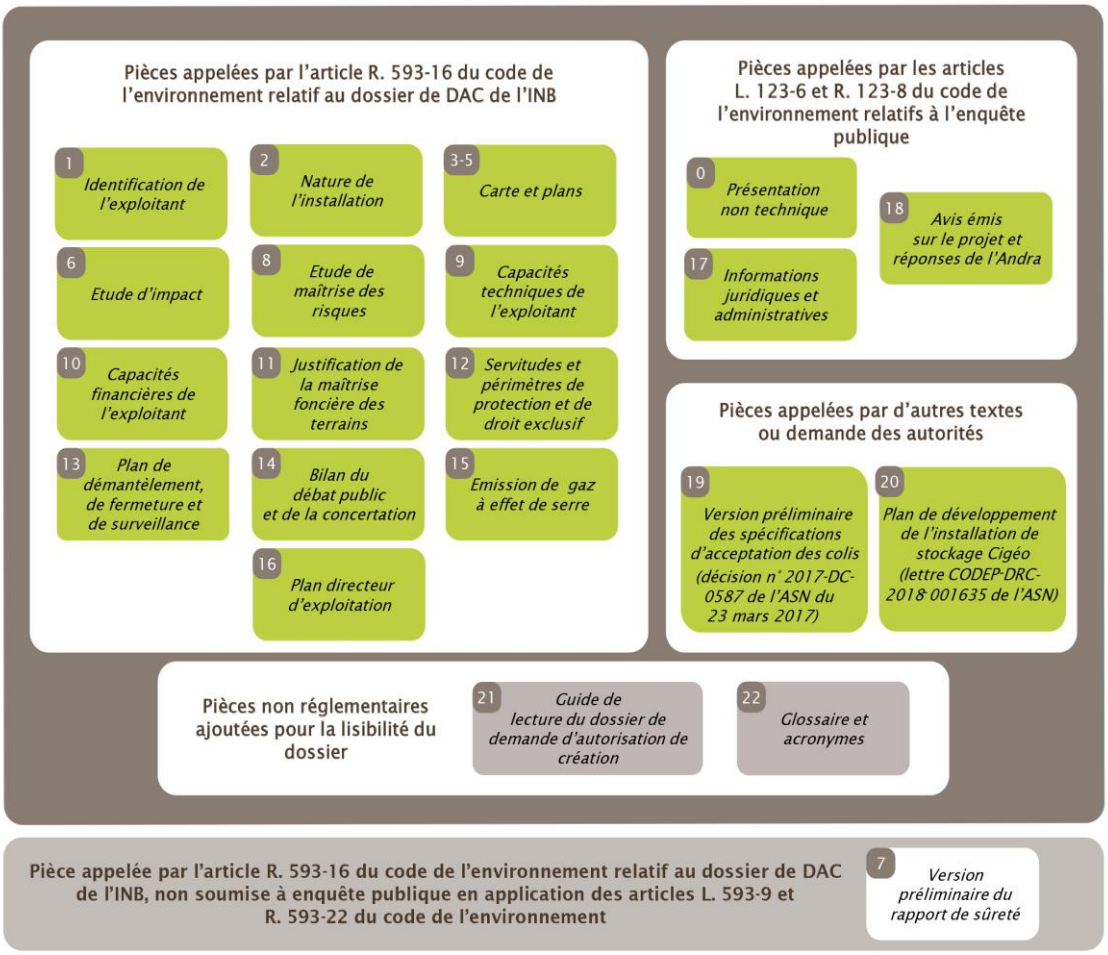
Ainsi, le présent plan de développement sera amené à être mis à jour périodiquement en lien avec :

i. les jalons décisionnels (décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire, mise en service de l'installation nucléaire pendant la phase industrielle pilote (Phipil), etc.) ;
ii. les évolutions possibles de la politique en matière de stratégie énergétique ;
iii. le retour d'expérience pendant le déploiement progressif de l'installation nucléaire de base Cigéo (le retour d'expérience du fonctionnement et de la surveillance du quartier pilote HA et des quatre premiers alvéoles MA-VL, etc.) ;
iv. les avancées technologiques (le retour d'expérience des essais au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, le retour d'expérience des démonstrateurs, les avancées sur la conception des ouvrages de fermeture, les avancées sur les études relatives aux colis de déchets bitumés menées par l'Andra et les producteurs, etc.).

[4] Une « tranche » d'ouvrage est un ensemble de bâtiments de surface et/ou d'ouvrages souterrains, construits dans une même séquence de contrats de travaux en engageant une tranche d'investissement, c'est-à-dire une partie du coût global de possession. À ce stade, le déploiement du quartier de stockage MA-VL est illustré par trois tranches successives de construction et d'exploitation d'alvéoles MA-VL, sans préjuger des décisions ultérieures qui pourraient être prises dans le cadre de la gouvernance du centre de stockage Cigéo (2).

1.2 Le plan de développement et sa place dans le dossier de demande d'autorisation de création

Le présent plan de développement est une des pièces constitutives du dossier de demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo rappelées dans la figure 1-1 ci-après. Toutefois, il n'est pas une des pièces appelées par le code de l'environnement.



CG-TE-D-MGE-AMOA-PU0-0000-21-0021-G

Figure 1-1 Structuration des pièces du dossier de demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo

Le présent plan de développement est relié en particulier aux pièces appelées par l'article R.593-16 du code de l'environnement du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire Cigéo suivantes :

- la pièce 2 « Nature de l'installation » (8), pièce appelée par l'article R. 593-16, III du code de l'environnement, décrivant la nature de l'installation, la nature des activités menées ainsi que ses caractéristiques techniques, les principes de son fonctionnement ainsi que les opérations qui y seront réalisées et les différentes phases de vie, leur enchaînement et leurs durées ;
- la pièce 6 « Étude d'impact du projet global Cigéo » (9), pièce également appelée par l'article R. 593-16 du code de l'environnement, identifiant et appréciant les incidences sur l'environnement du projet global Cigéo comprenant l'INB Cigéo et l'ensemble des opérations (activités, installations, ouvrages, travaux et aménagements) nécessaires à sa réalisation et à son exploitation ;

- la pièce 8 « Étude de maîtrise des risques » (10), pièce également appelée par l'article R. 593-16 du code de l'environnement, a pour objectif de donner une vision d'ensemble sur la sûreté de l'INB pour les phases de fonctionnement et d'après fermeture à long terme et dont le niveau de détail de la conception, des opérations et de la démonstration associée est adapté à la programmatique et aux enjeux associés du déploiement des installations/ouvrages pendant la phase de construction initiale, la phase de fonctionnement puis la phase de démantèlement et de fermeture. Le niveau de détail tient compte également du caractère innovant de certaines solutions technologiques et de l'avancée scientifique et technologique sur ces solutions ;
- la pièce 13 « Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance » (11) qui présente « *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* » (art. R. 593-16, al. 17). Par nature, cette pièce traite donc des modalités de fermeture et de la surveillance après cette fermeture. En lien avec cet objectif de fermeture et ses enjeux compte tenu de l'objectif fondamental de protection à long terme, le plan de développement présente le programme des études et essais en particulier sur les ouvrages de fermeture en cohérence avec la stratégie de fermeture proposée, l'état de la connaissance technologique et scientifique et les enjeux de la démonstration de sûreté après fermeture dont les enjeux de surveillance en lien avec les fonctions de sûreté après fermeture ;
- la pièce 16 « Plan directeur de l'exploitation » (2), pièce également appelée par l'article R. 593-16, III du code de l'environnement : « *Pour le centre de stockage en couche géologique profonde prévu à l'article L. 542-10-1, le dossier décrit au I contient également le plan directeur de l'exploitation mentionné au même article* » (art. R. 593-16, al. 18). Pour rappel, l'alinéa 5 de l'article L. 542-10-1 du même code : *« Afin de garantir la participation des citoyens tout au long de la vie d'une installation de stockage en couche géologique profonde, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs élabore et met à jour, tous les cinq ans, en concertation avec l'ensemble des parties prenantes et le public, un plan directeur de l'exploitation de celle-ci. »*. Le plan directeur de l'exploitation présente la phase industrielle pilote ;
- ses objectifs qui sont déclinés dans le présent document.

L'ensemble de ces pièces ont pour objet :

- de fournir les éléments support à la demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo en montrant la maîtrise de la connaissance scientifique et technologique, de la conception et de la sûreté de l'ensemble de l'INB Cigéo, avec un niveau de détail adapté à la temporalité du développement progressif de l'installation, prévu sur une période séculaire ;
- de fixer, en application de la réglementation et selon la logique de déploiement progressif, les prochaines étapes temporelles de l'installation nucléaire (mise en service des tranches MA-VL ultérieures, du quartier de stockage HA, fermeture des ouvrages souterrains, stockage le cas échéant de l'inventaire de réserve). À chacune de ces étapes, l'avancement des travaux de R&D et la disponibilité d'éléments de retours d'expérience (creusement, conditions d'exploitation, etc.) permettront de conforter les éléments de démonstration de sûreté et seront intégrés aux processus d'autorisation prévus.

1.3 L'objet et le périmètre du plan de développement de l'installation de stockage Cigéo

Le présent plan de développement vise à répondre à l'avis 2018-Avis-D-1 de la lettre de l'ASN du 12 janvier 2018 (1) dans lequel l'ASN estime que : « *le dossier de demande d'autorisation de création doit avoir un niveau de détail permettant, compte tenu du principe de réversibilité et du développement prévu de l'installation, d'avoir, conformément aux dispositions de l'article 3.1.6 de la décision de l'ASN du 17 novembre 2015 susvisée, la raisonnable assurance que la démonstration de sûreté nucléaire sera confirmée au moment de la remise de la version du rapport de sûreté établie pour la demande d'autorisation de mise en service de la partie concernée de l'INB.* ». Il répond également à la recommandation R14 de l'avis de l'Autorité environnementale sur le centre de stockage Cigéo (12, 13).

En regard des éléments de contexte présentés ci-avant, il constitue un document technique et programmatique de synthèse qui a pour objectif de présenter les études et essais prévus après le dépôt du dossier de demande d'autorisation de création, qui seront réalisés en soutien au développement technique de l'installation nucléaire Cigéo, à sa construction et son fonctionnement progressifs, ainsi qu'à sa fermeture (selon la stratégie retenue) et qui seront intégrés à la démonstration de sûreté associée, qu'ils permettront de conforter. Le plan de développement regroupe donc des activités de type ingénierie et des activités scientifiques et technologiques (études et recherche). Il rassemble des éléments issus de démarche de développement classique d'une installation nucléaire (qualification, essais par exemple) et des volets spécifiques liés au développement progressif, sur une durée d'ordre séculaire, de l'INB Cigéo.

En effet, compte tenu de la spécificité de l'installation nucléaire Cigéo, son développement progressif (*e.g.* ses activités de construction/mises en service successives) et ses phases temporelles, le présent plan de développement donne la vision intégrée et maîtrisée de l'Andra sur les étapes clés à franchir (pour la mise en service, etc.). Il présente une « feuille de route » cohérente et justifiée de l'ensemble des éléments techniques (études, essais, etc.) pour passer les futures itérations (connaissances scientifiques et technologiques, conception, sûreté). Il contribuera également à aider aux éventuelles prises de décision en cas de changement de stratégie en matière de gestion des déchets (*i.e.* la flexibilité de l'exploitation) ou en matière de politique énergétique (*i.e.* l'adaptabilité de la conception) (cf. Encadré ci-dessous).

Il rappelle les acquis de connaissances issus de plus de vingt années d'études permettant de mettre en perspective les différents éléments techniques au regard de leurs enjeux (sûreté, etc.).

Il apporte les éléments décrivant les moyens déployés par l'Andra pour assurer la maîtrise de ces sujets en termes de résolution à la fois techniques et calendaires lors des prochaines étapes (*e.g.* la mise en service du quartier pilote HA et des premiers alvéoles MA-VL, la construction puis la mise en service des tranches ultérieures, la construction puis la mise en service du quartier de stockage HA, la fermeture des quartiers, la fermeture du stockage, etc.). Pour cela, son niveau de détail est proportionné aux enjeux et aux échéances à plus ou moins long terme du développement progressif.

UN PLAN DE DÉVELOPPEMENT QUI S'APPUIE SUR DES ACQUIS ET S'ADAPTE AUX PHASES TEMPORELLES DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE CIGÉO ET A LA RÉVERSIBILITÉ

Le présent plan de développement se fonde sur les acquis de connaissances scientifiques et technologiques, un niveau de description de l'installation nucléaire en lien avec son déploiement progressif et les enseignements de la démonstration de sûreté associée au stade de la demande d'autorisation de création.

Il présente les études (consolidation de la connaissance scientifique et technologique, conception, sûreté) en regard des objectifs suivants :

- préparer la mise en service de l'installation nucléaire Cigéo pendant la phase industrielle pilote ;
- préparer la mise en service des tranches ultérieures pour le stockage des déchets HA et MA-VL, dont la mise en service des alvéoles pour le stockage des colis de déchets bitumés et la décision au préalable de choix du mode de stockage retenu, en intégrant de possibles optimisations ;
- préparer la fermeture de l'installation souterraine (bien qu'elle soit lointaine) en réponse à l'objectif fondamental de protection de l'homme et l'environnement après fermeture à long terme.

Le plan de développement présente les actions concernant les structures, les équipements et les composants de l'installation qui constituent un enjeu d'un point de vue la démonstration de sûreté et de la conception. D'un point de vue temporel, les actions décrites concernent l'ensemble des phases de déploiement de l'installation nucléaire. Il a donc pour objet de présenter les études et essais en lien avec :

- les éléments (conception, fonctionnement, etc.) qui permettront :
  - ✓ de conforter la démonstration de sûreté pendant la phase industrielle pilote jusqu'à la mise en service de la tranche 1 comprenant les objectifs de la phase industrielle pilote ainsi que pour les tranches ultérieures de déploiement de l'installation ;
  - ✓ de conforter la conception, le dimensionnement et la constructibilité des ouvrages ayant un enjeu au regard de la démonstration de sûreté ;
  - ✓ de qualifier le fonctionnement de ces ouvrages.
- les optimisations de conception envisagées pour les ouvrages réalisés au cours de la phase de construction initiale (les liaisons surface-fond, le quartier pilote HA, les quatre premiers alvéoles MA-VL et lors des mises en service ultérieures des alvéoles du quartier de stockage MA-VL et du quartier de stockage HA ainsi que pour la fermeture de l'installation) ;
- les éléments de démonstration sur la conception, la constructibilité et le fonctionnement des composants relevant de la flexibilité et de l'adaptabilité.

Le présent plan de développement ne couvre pas :

- les composants du centre de stockage hors périmètre de l'installation nucléaire (*e.g.* la ligne inter-sites, le terminal fret, etc.) ;
- les activités de développement « standard » des installations nucléaires de base, c'est-à-dire qui ne concernent pas les spécificités de l'installation nucléaire Cigéo ;
- les actions futures de gouvernance qui relèvent de la pièce 16 « Plan directeur de l'exploitation » (2) ;
- la description des opérations d'exploitation, de manutention, de démantèlement et de fermeture (*e.g.* sécurité, sûreté d'exploitation, etc.) (cf. « Pièce 2 « Nature de l'installation » (8), pièce 8 « Étude de maîtrise des risques » (10) et pièce 13 « Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance » (11)).

LE TRAITEMENT DE LA RÉVERSIBILITÉ DANS LE PLAN DE DÉVELOPPEMENT DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE CIGÉO

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 d'un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives 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. »

De par son périmètre, le plan de développement de l'installation de stockage Cigéo présente un certain nombre d'actions relatives à ces quatre axes :

- **la progressivité de la construction**. Cet axe est pris en compte depuis le début des actions de développement du projet au regard des itérations successives sûreté/conception/connaissances (cf. Chapitre 1.1 du présent document) et continue à sous-tendre les objectifs de définitions des actions (cf. Chapitre 1.4.1 du présent document) ;
- **l'adaptabilité.** Les actions relatives à cet axe sont présentées dans le chapitre 5 du présent document ;
- **la flexibilité.** Cet axe concerne notamment les questions sur le stockage des colis de déchets bitumés (cf. Chapitre 3.1.3 du présent document) et les modalités de fermeture de l'installation (cf. Chapitre 4.1.1 du présent document) ;
- **la récupérabilité.** Les principales actions concernant cet axe sont déclinées dans le cadre des essais support à la mise en service des ouvrages (cf. Chapitres 2.6.2.4 et 2.7.3 du présent document).

1.4 Les démarches et stratégies support aux actions décrites dans le plan de développement

Pour atteindre ses objectifs de protection de l'homme et de l'environnement, la réalisation, la mise en service et le fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo requièrent un certain nombre d'actions et d'étapes nécessaires et spécifiques permettant d'aboutir à sa mise en service et à son fonctionnement.

La réalisation de ces différentes étapes s'appuie sur un certain nombre de démarches et de stratégies relevant en particulier des bonnes pratiques et de demandes réglementaires :

- la démarche progressive de développement et de démonstration (cf. Chapitre 1.4.1 du présent document) ;
- le programme des activités scientifiques et technologiques (cf. Chapitre 1.4.2 du présent document) ;
- les apports des démonstrateurs et des ouvrages témoins (cf. Chapitre 1.4.3 du présent document) ;
- la démarche de qualification des éléments importants pour la protection (EIP) (cf. Chapitre 1.4.4 du présent document) ;
- la démarche de réalisation des essais en support à la recette des ouvrages et de leurs composants ainsi qu'à leur démarrage (cf. Chapitre 1.4.5 du présent document) ;
- le processus d'acceptation des colis (cf. Chapitre 1.4.6 du présent document) ;
- la stratégie de surveillance (cf. Chapitre 1.4.7 du présent document).

1.4.1 Le développement progressif des composants

Dans le cadre de la réversibilité, la progressivité de la construction favorise l'intégration aux futures tranches de construction d'améliorations qui seront rendues possibles par les progrès scientifiques et techniques et par le retour d'expérience acquis sur la durée de fonctionnement d'ordre séculaire. Dès lors qu'une meilleure solution technique aura été développée et aura atteint un degré de maturité suffisant, elle pourra, sous réserve de son autorisation, être intégrée aux ouvrages à construire (2). Le développement progressif de l'installation de stockage s'appuiera pendant toute la durée de son fonctionnement *a minima* sur une veille scientifique et technologique, voire sur la mise en œuvre en propre par l'Andra d'études et de recherches en matière de développement du stockage. Des évolutions de conception pourraient également provenir de prescriptions formulées par l'ASNR à l'occasion des réexamens périodiques de sûreté. La surveillance et l'exploitation de l'INB Cigéo amèneront aussi naturellement des éléments de connaissance additionnels utiles pour l'optimisation de sa conception et de son exploitation. Le développement progressif favorise autant la maîtrise des coûts du stockage que le maintien du plus haut niveau de sûreté (2).

Ainsi, la progressivité de la construction de l'INB Cigéo s'appuie sur une démarche permettant une maturation technologique progressive des éléments (matériel, composants, système, etc.) puis leur construction et leur qualification. Cette démarche progressive permet ainsi de conforter la constructibilité et le fonctionnement des ouvrages et de leurs composants, pris individuellement et dans leur globalité, de façon intégrée à l'ensemble de l'installation. Cette démarche s'inscrit dans les itérations de sûreté/conception/connaissances décrites au chapitre 1.1 du présent document.

Au stade du dossier de demande d'autorisation de création, cette démarche progressive conduit à avoir un état de développement des différents composants de l'installation proportionnés à leurs enjeux et à leur temporalité. De même, le détail des descriptions des actions présentées dans ce document dépend de la temporalité dans laquelle elles s'inscrivent : les actions support à la phase de construction initiale sont ainsi plus détaillées que celles relatives au déploiement des tranches ultérieures, voire de la fermeture de l'installation.

LA QUALIFICATION DANS LE PLAN DE DEVELOPPEMENT

Dans le cadre du plan de développement de l'installation nucléaire du centre de stockage, le terme de « qualification » recouvre différentes significations. Il peut rendre compte de la démarche permettant d'atteindre un niveau de maturité technologique ou industriel. Il peut également traduire la démarche permettant de respecter l'atteinte ou le respect d'exigences et de critères définis pour satisfaire les objectifs fixés par la réglementation.

1.4.2 La recherche et développement de demain

Dans le cadre des itérations sûreté/conception/connaissances, l'Andra s'implique depuis plus d'une vingtaine d'années dans des projets collaboratifs nationaux ou européens de recherche et développement scientifique et technologique, en tant que pilote, participant, bénéficiaire ou encore observateur (14).

Par ailleurs, l'Andra a engagé en 2019 un processus de réflexion prospective sur la recherche et développement (R&D) après le dépôt du dossier de demande d'autorisation de création, en termes d'orientations thématiques (scientifiques et techniques) structurantes, de moyens humains et financiers, et de modalités de réalisation des travaux de R&D (en propre, partenariat, etc.), en s'appuyant sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques acquis depuis plus de 20 ans et en regard des prochaines étapes clés de développement du centre de stockage Cigéo ainsi que de leurs temporalités.

Ces réflexions ont pour objet de tracer les grandes orientations thématiques structurantes de cette R&D de demain, en soutien au développement des activités opérationnelles de l'Andra, en termes à la fois d'objectifs opérationnels et d'objectifs scientifiques et techniques correspondants. Les orientations ainsi tracées répondent à des objectifs de consolidation, de précision, d'optimisation technico-économique (à sûreté identique ou accrue), d'accroissement des marges de conception et intègre une logique prospective et d'innovation visant à préparer les progrès de demain.

Cette réflexion permet d'identifier les axes de recherches sur lesquels l'Andra focalise la R&D scientifique et technologique de son « cœur de métier ». En effet, cette R&D ne couvre pas tous les domaines, toutes les thématiques ni tous les composants des stockages mais elle se focalise sur celles et ceux correspondant aux besoins d'une maîtrise du fonctionnement des stockages, pour leurs aspects spécifiques et/ou leurs objectifs (sûreté en exploitation et en après-fermeture, coûts, développement progressif, lien avec les producteurs, filières de gestion des déchets, environnement, etc.). Par ailleurs, cette R&D s'inscrit dans un continuum de travaux de R&D entre science et ingénierie (et société). L'Andra garde néanmoins un regard sur des domaines et composants hors de son « cœur de métier » mais dont les progrès de connaissances pourraient être intégrés pour le développement du centre de stockage Cigéo.

Les composants « cœur de métier » sont notamment les déchets et les colis de déchets, le milieu géologique, les conteneurs de stockage, les ouvrages souterrains (galeries, carrefours, descenderies, puits), les alvéoles/ouvrages de stockage (incluant le génie civil associé) et les ouvrages de fermeture. Les domaines/thématiques scientifiques et technologiques « cœur de métier » concernent notamment les process industriels de réalisation, d'exploitation et de surveillance associés aux composants « cœur de métier » (travaux souterrains, génie civil, métallurgie/soudure, etc.), le comportement et les termes sources au sens large des déchets en situation de stockage, en lien avec leur caractérisation, traitement et conditionnement, le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, les géosciences, le transfert de chaleur et d'énergie dans les milieux poreux et les milieux ouverts, les sciences des matériaux, les sciences de l'environnement, la simulation numérique multi-physique et multi-composants, la chaîne de données.

Outre ces axes de R&D « cœur de métier » portés par l'Andra, le développement progressif bénéficie de dynamiques de R&D portées par d'autres acteurs ou dans d'autres domaines :

- autres maîtres d'ouvrage, au sein de la filière nucléaire et/ou dans d'autres filières (par exemple : génie civil, béton, aéronautique) ;
- organismes de recherche au travers notamment de plans nationaux ou de grands projets européens ;
- homologues de l'Andra à l'étranger.

Enfin, cette R&D est adossée à un plan de veille active, afin de capter les avancées des connaissances et les innovations émergentes qui seraient pertinentes pour le développement de l'INB Cigéo et de les capitaliser, pour faire évoluer les hypothèses scientifiques et techniques retenues ou pour ouvrir des perspectives de progrès sur tout le spectre de ses activités (conception, réalisation, exploitation, sûreté d'exploitation et après-fermeture).

1.4.3 Les démonstrateurs et les ouvrages témoins

La progressivité du développement de l'installation nucléaire Cigéo se décline également au travers de la réalisation d'ouvrages qui participent à l'apport d'éléments soit de démonstration de la constructibilité ou du fonctionnement de composants (*i.e.* les démonstrateurs de constructibilité ou de fonctionnement), soit de surveillance de l'évolution des composants dans le domaine de fonctionnement autorisé au regard tant de la sûreté en exploitation et en particulier des règles générales d'exploitation (RGE) que de la sûreté en après fermeture (*i.e.* les ouvrages témoins).

1.4.3.1 Les démonstrateurs de constructibilité et de fonctionnement

Ces ouvrages ont pour objet d'apporter les éléments de confortation de démonstration de constructibilité ou de fonctionnement d'ouvrages similaires de l'installation nucléaire Cigéo dans les conditions industrielles de fonctionnement. Ces ouvrages ont également pour objet d'apporter des éléments confortant la maîtrise de leur surveillance et de leur comportement dans le temps. Ils ont en particulier pour objectifs (2) :

- de qualifier les performances des procédés industriels de creusement en vraie grandeur et dans les conditions de mise en œuvre réelle de l'installation souterraine ;
- de conforter *in situ* les modalités de conception et de construction au regard des caractéristiques du milieu géologique dans la zone d'implantation réelle de l'installation souterraine[5 et 6] ;
- de conforter les hypothèses relatives aux propriétés du milieu géologique retenues dans les démonstrations de sûreté, en particulier en après-fermeture ;
- d'éprouver la qualité des ouvrages réalisés en vraie grandeur (galeries et alvéoles de taille supérieure à ceux qui peuvent être réalisés en préalable au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne) et de surveiller leur comportement, notamment l'atteinte d'un comportement mécanique asymptotique durable à partir duquel leur déformation progressive, liée à leur mise en charge par la roche, est très limitée[7].

Des démonstrateurs d'alvéoles HA et MA-VL, non destinés à recevoir des colis de déchets, permettront de préparer et conforter les modalités de réalisation, d'exploitation et de surveillance des alvéoles industriels qui seront construits ensuite.

---

[5] Les données utilisées pour la conception au stade du dossier de demande de création sont issues des campagnes de reconnaissance géologique depuis la surface par forages (par nature ponctuels) et par la reconnaissance sismique 2D/3D, d'études de terrain et des travaux menés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Celui-ci est situé à environ 5 km de la zone d'implantation des zones de stockage à une profondeur un peu inférieure (le poids des terres y est différent), ce qui nécessite de confirmer certaines données. On notera toutefois la remarquable continuité géologique latérale de la roche argileuse hôte mise en évidence par l'ensemble des travaux de reconnaissance.

[6] Les creusements envisagés pendant la phase industrielle pilote sont associés à de nombreuses caractérisations et mesures des paramètres géotechniques. De plus, ils permettent une reconnaissance géologique de l'ensemble de la zone où seront construits les ouvrages souterrains des cinquante premières années (grande boucle du quartier de stockage MA-VL).

[7] Cette surveillance permet de confirmer le domaine de fonctionnement des ouvrages de soutènement, d'améliorer les stratégies de surveillance et de s'assurer que la récupérabilité des colis reste possible.

1.4.3.2 Les ouvrages témoins

Un ouvrage « témoin » est un ouvrage qui évolue dans des conditions représentatives de celles dans lesquelles évolue un ouvrage de même type au regard d'un phénomène donné (même environnement thermique, etc.). Son fonctionnement et son comportement sont ainsi représentatifs du fonctionnement et du comportement de l'ouvrage dont il est le témoin (alvéole, etc.) et pour la même phase de déploiement de l'installation nucléaire Cigéo. Ainsi, la surveillance du fonctionnement et du comportement de cet ouvrage « témoin » permettant d'en caractériser l'évolution est transposable à l'ensemble des ouvrages de même type.

Ces ouvrages « témoins » sont ainsi équipés de dispositifs de surveillance de l'installation qui ne nécessitent pas d'être positionnés dans l'ensemble des ouvrages de même type (du fait par exemple de la limitation des contraintes d'exploitation en présence de rayonnement, etc.). Ces ouvrages « témoins » peuvent être *a priori* de toute nature, actifs ou inactifs.

À titre d'exemple, les alvéoles témoins HA, au même titre que les alvéoles HA construits dans le quartier pilote HA pendant la phase de construction initiale, participent à confirmer et valider la capacité à surveiller ces ouvrages et à vérifier qu'ils évoluent tels que prévus par rapport aux exigences qui leur sont attribuées (cf. Chapitre 2.6.3.6 du présent document). Ils permettent d'ajuster si nécessaire les paramètres à surveiller, les dispositions de surveillance associées, leur nombre, leur localisation lors de la réalisation du quartier de stockage HA, voire à participer à l'évolution de la conception elle-même des alvéoles s'il y a lieu.

1.4.4 La démarche générale de qualification des éléments importants pour la protection (EIP)

Parmi l'ensemble des ouvrages et équipements de l'installation nucléaire de base Cigéo, certains présentent des spécificités au regard des fonctions de sûreté qu'ils doivent accomplir ou auxquelles ils participent. C'est en particulier le cas pour les éléments importants pour la protection des intérêts (EIP) (*i.e.* La sécurité, la santé et la salubrité publiques, la protection de la nature et de l'environnement) mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement dont les exigences vis-à-vis de leur définition et de leur gestion sont fixées par l'arrêté du 7 février 2012 (15).

En particulier, l'article 2.5.1 indique : « *Les éléments importants pour la protection font l'objet d'une qualification, proportionnée aux enjeux, visant notamment à garantir la capacité desdits éléments à assurer les fonctions qui leur sont assignées vis-à-vis des sollicitations et des conditions d'ambiance associées aux situations dans lesquelles ils sont nécessaires. Des dispositions d'études, de construction, d'essais, de contrôle et de maintenance permettent d'assurer la pérennité de cette qualification aussi longtemps que celle-ci est nécessaire* ».

L'Andra, en tant qu'exploitant, répond à la décision n° 2015-DC-0532 de l'ASN relative au rapport de sûreté des installations nucléaires de base (16) qui indique dans son article 4.5.7 de son annexe, que cette démarche de qualification des EIP « *comprend notamment des éléments tels que :*

- *la définition de sollicitations, en particulier mécaniques et thermiques, enveloppes des conditions de fonctionnement normales et en mode dégradé et des situations d'incident et d'accident, ainsi que la démonstration de leur représentativité, en tenant compte de la durée pendant laquelle les EIP sont prévus de fonctionner ;*
- *la description des éléments permettant de démontrer la qualification ou le respect de normes, telles que des essais, contrôles ou études ;*
- *la définition des modalités retenues pour assurer et surveiller la pérennité de la qualification.* ».

Ainsi, la démarche de qualification des EIP consiste à prescrire comment apporter la preuve, *in fine*, de leur capacité (structures, systèmes, composants, etc.) à assurer les fonctions qui leur sont assignées dans la démonstration de sûreté dans toutes les situations rencontrées, pour des conditions d'ambiance spécifiques, sur une durée de vie spécifiée.

Cette démarche s'appuie donc sur la vérification du bon fonctionnement de l'EIP dans des conditions normales d'utilisation, la vérification de sa robustesse aux agressions considérées lorsque son fonctionnement s'avère nécessaire et la vérification de l'acceptabilité du vieillissement de l'EIP dans ses conditions d'exploitation.

Les différents principes/méthodes qui permettent de répondre aux exigences assignées aux EIP sont :

- la qualification acquise par le constructeur et sous réserve de démontrer que l'EIP a obtenu sa qualification pour des conditions enveloppes à celles envisagées dans la démonstration de sûreté ;
- la qualification par essai (*ex* : utilisation de tables vibrantes pour la qualification au séisme) ;
- la qualification par analyse (calculs et modélisations numériques) (ex. : modélisation de l'EIP et vérification de sa tenue mécanique, de son comportement dynamique) ;
- la qualification mixte qui consiste à combiner les méthodes par essais et par analyse.

Cette qualification est basée sur la définition de sollicitations enveloppes, prenant en compte :

- la définition des conditions d'ambiance dans lesquelles leur fonction doit être maintenue ;
- la définition des cas de charge auxquels les EIP doivent pouvoir faire face. Un « cas de charge » (ou niveau de risque) est défini pour dimensionner les installations, afin qu'elles résistent à une agression ;
- la prise en compte du vieillissement et de l'obsolescence.

Cette qualification est réalisée :

- avant la mise en service des éléments. Cela consiste à démontrer ou vérifier que :
  - ✓ chaque exigence définie[8] de conception, de réalisation et de fonctionnement est respectée ;
  - ✓ chaque exigence définie prévue en exploitation est réalisable.
- lors de toute modification susceptible de remettre en cause leur qualification. Cela consiste à vérifier que chaque exigence définie susceptible d'avoir été modifiée est satisfaite avant la remise en service des éléments importants pour la protection des intérêts.

Les résultats de la qualification prouvant que l'élément important pour la protection des intérêts répond aux exigences spécifiées sont tracés et archivés. Une fois la qualification prononcée, l'élément est réputé conforme. Il est alors géré ou surveillé pour garantir et vérifier le maintien de sa conformité.

[8] Une exigence définie est une exigence assignée à un élément important pour la protection, afin qu'il remplisse avec les caractéristiques attendues la fonction prévue dans la démonstration mentionnée au deuxième alinéa de l'article L. 593-7 du code de l'environnement, ou à une activité importante pour la protection afin qu'elle réponde à ses objectifs vis-à-vis de cette démonstration.

1.4.5 La démarche générale de réalisation des essais pour l'autorisation de mise en service et des essais en actif après l'autorisation de mise en service

La confortation de la faisabilité et du fonctionnement des différents composants de l'installation nucléaire Cigéo se traduit par la réalisation d'essais successifs, de leur conception à leur réception permettant de demander l'autorisation de mise en service.

Ces étapes ont pour objet de vérifier *a minima* :

- la conformité des équipements aux plans et schémas de conception et de réalisation, à la réglementation, aux normes en vigueur, aux recommandations des constructeurs et aux règles de l'art ;
- la capacité des équipements à respecter les exigences de sûreté, les exigences concernant la radioprotection, les exigences concernant la protection de l'environnement et les exigences concernant la sécurité et la protection de la santé ;
- la capacité des équipements à assurer leurs fonctions et à atteindre les performances attendues, ainsi que leur fiabilité.

La réalisation des essais implique de raisonner suivant un découpage fonctionnel de l'installation en complément d'une analyse unitaire d'équipements. Ceci permet de valider les fonctionnalités en plus du rôle propre de chaque équipement. Il s'agit de démontrer, d'une part que les caractéristiques de chaque équipement sont conformes aux attendus et aux éventuelles spécifications qui y sont rattachées (essais unitaires) et, d'autre part, que les comportements et les fonctions d'un ensemble d'équipements correspondent aux besoins pour lesquels ils sont prévus (essais fonctionnels par ensemble).

La première étape de cette démarche consiste en la définition des exigences attendues au regard des essais à mener, telles que les critères d'acceptation des essais ou de leur performance.

Les étapes suivantes se traduisent par la réalisation d'essais selon un plan général d'essais (cf. Figure 1-2).

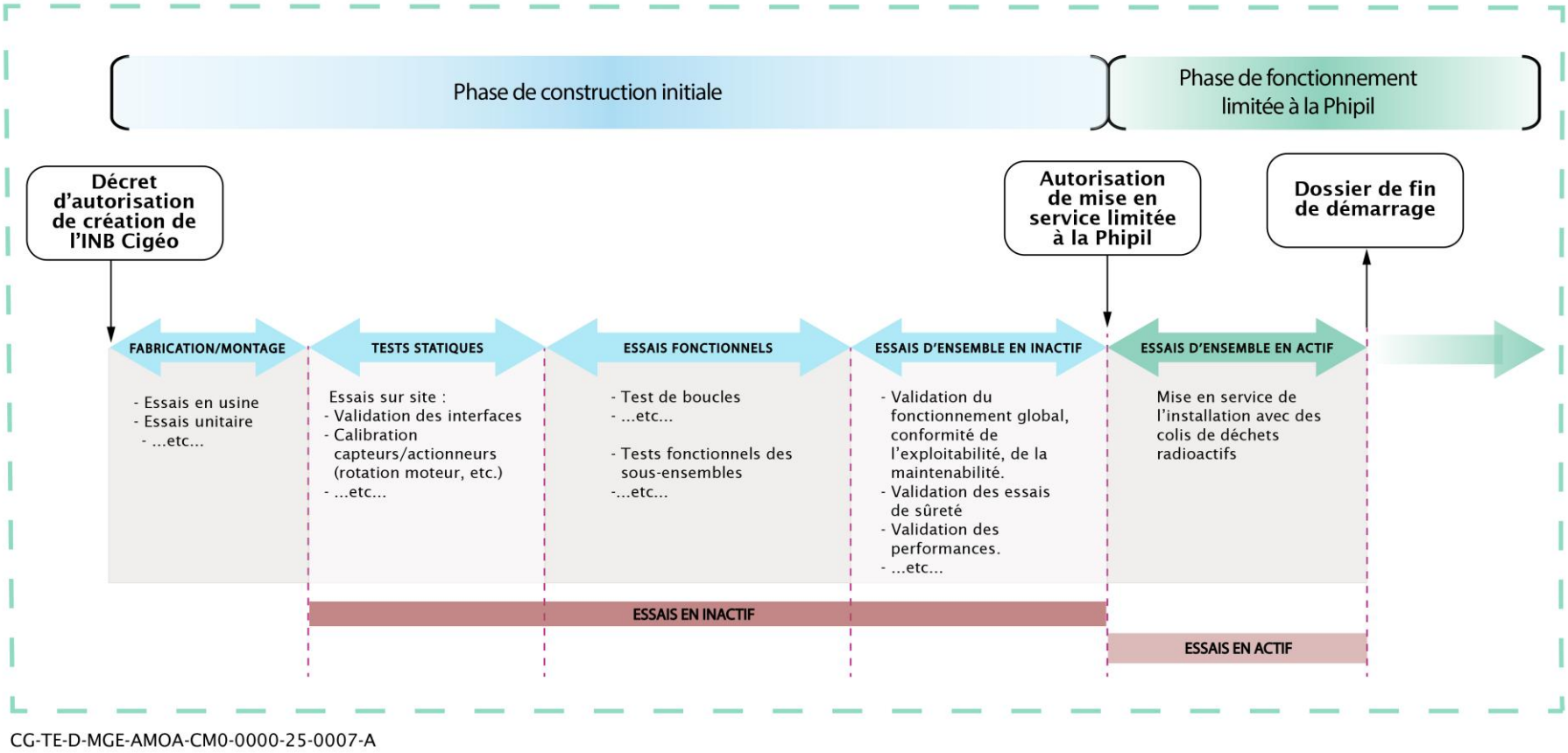
Suite aux essais « prototype » qui permettent de démontrer que les équipements retenus conviennent à leurs exigences, les essais se décomposent en plusieurs phases :

- phase 0 : essais qui permettent de valider la conception, le montage et le fonctionnement des composants/équipements en usine avant livraison sur site, y compris les tests des logiciels. Les essais fournisseurs sont réalisés dans un environnement le plus représentatif des conditions de site ;
- phase 1 : essais statiques en cours de montage et de fin de montage permettant le passage en essais fonctionnels ;
- phases 2.1 et 2.2 : essais fonctionnels permettant de valider la mise au point et la configuration des paramètres nécessaires au fonctionnement de l'installation conformément aux spécifications fonctionnelles ;
- phase 2.3 : essais d'ensemble en inactif qui permettent de valider le fonctionnement global de l'exploitabilité et de la maintenabilité des équipements ;
- phase 3 essais en actif qui permettent également de valider le fonctionnement global de l'exploitabilité et de la maintenabilité des équipements pour ces conditions en prenant en compte les contraintes de sûreté, de protection, de sécurité et des facteurs organisationnels et humains (FOH). Ces essais ont pour objet de vérifier que les exigences de sûreté sont prises en compte.

À chaque phase d'essai, sont testés :

- le fonctionnement normal des équipements concernés (individuels, sous-ensembles, ensembles, systèmes supports dont la ventilation nucléaire et le contrôle-commande) ;
- le fonctionnement en mode dégradé pour lequel l'exploitation est adaptée selon le type d'incident et peut être réalisée en mode dégradé à partir de différents lieux de conduite (les modes de dépannage et d'intervention sont vérifiés et validés).

Ces essais couvrent à la fois l'intégration, la vérification, la validation et la qualification du système conformément au plan « intégration, vérification, validation, qualification » (IVVQ) de l'installation nucléaire Cigéo qui identifie les jalons de développement et de qualification des composants ou de remontage de niveau système, jusqu'aux différentes étapes de mise en service. Ils prennent en compte les spécificités de conception (*e.g.* trois zones d'implantation : la zone descenderie, la zone puits et la zone d'implantation des ouvrages souterrains) et de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.



CG-TE-D-MGE-AMOA-CM0-0000-25-0007-A

Figure 1-2 Schéma d'enchaînement général des essais pour l'autorisation de mise en service et des essais en actif après l'autorisation de mise en service

Par ailleurs, les plans particuliers d'essais définissant en détail les conditions et l'organisation pour la réalisation des essais pour chaque équipement de l'installation nucléaire Cigéo seront établis pendant sa phase de construction initiale puis sa phase de fonctionnement.

La préparation de la phase de construction initiale traite ainsi des essais de phase 0. Les essais de phase 1, phase 2 et phase 3 seront réalisés sur site dans le cadre de la phase industrielle pilote pour la mise en service des composants concernés (*e.g.* les installations de surface, les liaisons surface-fond, le quartier pilote HA, les quatre premiers alvéoles MA-VL, le process nucléaire, les systèmes support (ventilation, etc.), etc.). Les essais seront déployés selon le même phasage en lien avec le déploiement progressif de l'installation nucléaire Cigéo pour les phases ultérieures.

1.4.6 La maîtrise du processus d'acceptation des colis de déchets radioactifs

Le processus d'acceptation des colis de déchets constitue l'interface entre l'Andra exploitant de l'installation nucléaire Cigéo et les producteurs de colis de déchets afin de vérifier la conformité des colis de déchets à stocker sur l'installation nucléaire Cigéo avec les spécifications d'acceptation qui leur sont applicables.

Deux étapes du processus d'acceptation des colis sont imposées par la décision n° 2017-DC-0587 de l'ASN relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de stockage (17) :

- l'approbation : acte par lequel l'Andra, en tant qu'exploitant d'une INB de stockage disposant de spécifications d'acceptation des colis de déchets radioactifs, matérialise un accord générique sur les dispositions relatives au conditionnement des déchets radioactifs sous la forme d'un colis de déchets radioactifs définitif selon une procédure donnée ;
- l'acceptation : acte par lequel l'Andra matérialise son accord pour le stockage dans l'INB d'un colis de déchets radioactifs donné.

Le processus d'acceptation commence réglementairement à partir de l'accord de l'ASNR sur les spécifications préliminaires d'acceptation des colis (cf. Encadré ci-dessous) qui deviennent alors les spécifications d'acceptation applicables. Cet accord ne peut intervenir qu'après la délivrance du décret portant autorisation de création de l'INB Cigéo et au plus tard à la mise en service de l'installation.

LA DÉMARCHE DE CONSTRUCTION DES SPÉCIFICATIONS PRELIMINAIRES D'ACCEPTATION DES COLIS DE DECHETS

Les spécifications d'acceptation des colis mentionnées à l'article L. 542-12 du code de l'environnement définissent les critères qu'un colis de déchets radioactifs définitif doit respecter pour être accepté dans l'INB.

Conformément à l'article 4.2.2 de l'annexe à la décision n° 2017-DC-0587 relative au conditionnement de l'Autorité de sûreté nucléaire (17), l'Andra présente une version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans le dossier de demande d'autorisation de création (18). Ces spécifications préliminaires d'acceptation, après d'éventuelles modifications, constitueront les spécifications d'acceptation une fois l'accord de l'ASNR donné. Cet accord interviendra au plus tôt avec l'autorisation de création de l'installation.

Les spécifications préliminaires d'acceptation portent sur les caractéristiques et propriétés radiologiques, physiques, mécaniques et chimiques des colis. Elles sont déclinées de la démonstration de sûreté de l'INB Cigéo pendant son fonctionnement et après sa fermeture et établies eu égard aux besoins des producteurs. Elles tiennent compte de la durée de fonctionnement et de surveillance.

Ainsi, l'établissement des spécifications préliminaires d'acceptation des colis, présentées dans le dossier de demande d'autorisation de création (18), résulte de la mise en œuvre d'une démarche qui relie la connaissance des colis de déchets radioactifs, la conception et la démonstration de sûreté associée.

Les spécifications d'acceptation pourront être amenées à évoluer en lien avec le développement progressif de l'INB. Leur mise à jour suivra le processus de gestion des modifications et de réexamens décennaux propres aux INB. Leurs modifications se feront sur la base des contenus ultérieurs de la démonstration de sûreté et en cohérence avec l'installation telle que conçue et ses évolutions envisagées.

Pour le cas spécifique des familles de colis dont les modalités de conditionnement ne sont pas définies au moment de la demande d'autorisation de création (cf. Chapitre 3.1.1 du présent document), l'autorisation associée à ces futurs conditionnements est encadrée par la décision conditionnement (applicable également aux INB/S) (17). Cette décision prévoit notamment la possibilité d'échanges amont entre le producteur et l'Andra sur la base d'un conditionnement proposé par le producteur ; l'Andra vérifiant l'absence de point rédhibitoire vis-à-vis de la conception et de la sûreté du stockage. En cas de difficulté avérée, des leviers pourront être proposés *via* des études complémentaires comme indiqué dans les principes généraux de la Pièce 19 - Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis (18).

1.4.7 La stratégie de la surveillance

L'Andra a défini une stratégie de surveillance au regard des spécificités de l'installation nucléaire Cigéo, avec en particulier (i) un objectif de protection à long terme de l'homme et l'environnement assuré de manière passive (*i.e.* sans intervention) une fois l'installation souterraine scellée et remblayée et (ii) une installation nucléaire permettant la récupérabilité des deux catégories de déchets (HA et MA-VL) pris en charge.

Cette stratégie prend en compte un certain nombre d'éléments de natures différentes :

- l'ensemble des textes réglementaires nationaux applicables pour les installations nucléaires de base ainsi que ceux uniquement applicables à un « centre de stockage en couche géologique profonde », en particulier pour tenir compte de la réversibilité. Il s'agit des arrêtés du 7 février 2012 (15) et du 11 janvier 2016 (16) ;
- des guides comme par exemple le guide de sûreté n°1 de l'ASN (19) et celui de 2013 (20) ainsi que des rapports n °7 et 8 de la CNE[9] (22, 23) ;
- les standards internationaux de l'AIEA[10] (24–26) et pratiques internationales (*e.g.* Le projet européen Modern2020)[11] ;
- les éléments relatifs à la surveillance de l'installation nucléaire Cigéo issus des débats publics et des consultations le concernant ;
- les données techniques issues des producteurs de déchets (description des colis, etc.).

La déclinaison des données d'entrée externes pour la stratégie de surveillance se traduit par la définition des principes directeurs suivants :

- le besoin de définir/conforter l'état initial des composants importants pour la sûreté en après fermeture (par exemple l'état initial de la couche du Callovo-Oxfordien au moment de la fermeture définitive de l'installation souterraine) et vis-à-vis des fonctions de récupérabilité ;
- la déclinaison de la réversibilité telle que définie dans la loi n °2016-1015 du 25 juillet 2016 (27) en particulier au regard du développement progressif de l'installation nucléaire Cigéo et de l'utilisation des meilleures techniques disponibles. Il s'agira en particulier de tirer parti du retour d'expérience de la surveillance pendant la phase industrielle pilote pour la conception et la surveillance de phases ultérieures du fonctionnement de l'installation ;
- la prise en compte pour la surveillance des dispositions générales indiquées dans l'arrêté du 7 février 2012 (15) au regard de la minimisation des risques pendant l'exploitation de l'installation et de l'utilisation des bonnes pratiques.

Une partie de ces principes directeurs relève de choix en propre de l'Agence. Il s'agit en particulier de la réalisation d'alvéoles témoins (cf. Chapitre 1.4.2 du présent document).

[9] CNE : Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs instituée par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (https://www.cne2.fr/) (21).
[10] AIEA : Agence Internationale de l'énergie atomique (https://www.iaea.org/fr)
[11] http://www.modern2020.eu/

2

La préparation de la mise en service de l'installation nucléaire Cigéo (Phipil)

2.1	L'environnement de surface et le milieu géologique	32
2.2	Les colis de déchets radioactifs	53
2.3	Les installations de surface	65
2.4	Les ouvrages de liaison	73
2.5	Le process nucléaire	85
2.6	Le quartier pilote HA	95
2.7	Les quatre premiers alvéoles MA-VL	115
2.8	Le système de stockage en grand	130
2.9	L'organisation temporelle des actions	135

Pour rappel, l'installation nucléaire de base Cigéo, ses caractéristiques techniques, les principes de son fonctionnement, les opérations qui y seront réalisées et les différentes phases de sa réalisation sont décrits dans la pièce 2 « Nature de l'installation » (8) (cf. Figure 2-1).

L'objectif de ce chapitre est de présenter les actions de confortation des éléments retenus dans les évaluations de sûreté et de qualification de conception associés, de constructibilité et de fonctionnement des ouvrages réalisés pour la mise en service du quartier pilote HA et des quatre premiers alvéoles MA-VL.

Ce chapitre se décompose selon les composants clés pour cette phase de fonctionnement : l'environnement de surface et les milieux géologiques (cf. Chapitre 2.1 du présent document), les colis concernés par cette phase (cf. Chapitre 2.2 du présent document), les installations de surface (cf. Chapitre 2.3 du présent document), les ouvrages de liaison (cf. Chapitre 2.4 du présent document), le process nucléaire (cf. Chapitre 2.5 du présent document), le quartier pilote HA (cf. Chapitre 2.6 du présent document) et les quatre premiers alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.7 du présent document). Pour ces composants, il s'agit de présenter la démarche générale de développement progressif de l'installation de stockage et sa déclinaison opérationnelle au regard des spécificités de ces composants.

Pour donner suite aux actions relatives aux composants clés, un chapitre traite également des actions ayant une incidence sur plusieurs composants voire sur l'installation nucléaire dans son ensemble (cf. Chapitre 2.8 du présent document).

La dernière partie est un chapitre programmatique qui précise les actions déjà en cours ou prévues concernant les éléments nécessaires à la mise en service de l'INB et en particulier du quartier pilote HA et des quatre premiers alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.9 du présent document).

Selon leur nature, les éléments décrits dans ce chapitre concernent des actions qui seront menées avant la phase de constructions initiale, pendant la phase de construction initiale ou bien au cours de ces deux phases.

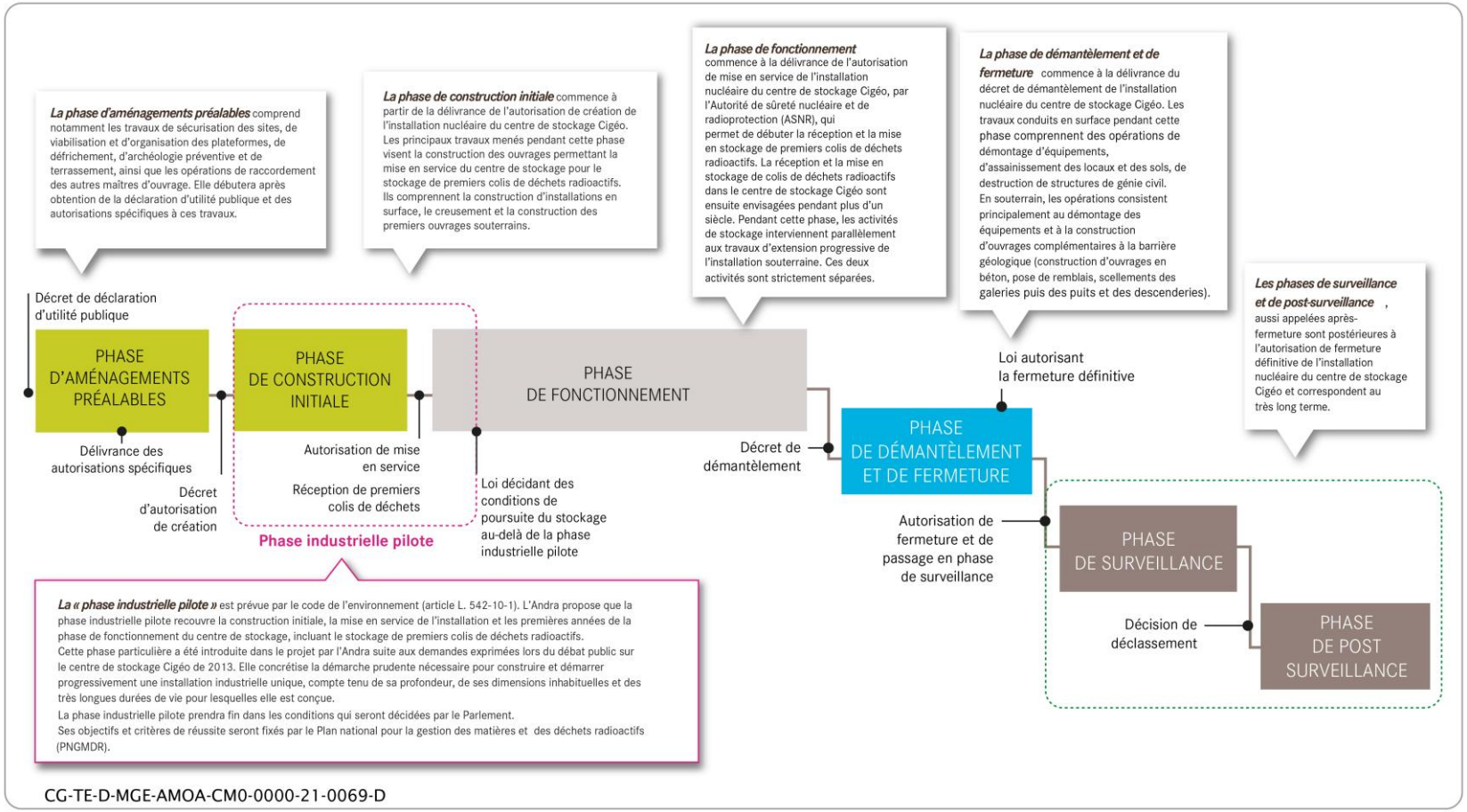


Figure 2-1 Illustration des phases temporelles de développement de l'INB Cigéo

2.1 L'environnement de surface et le milieu géologique

2.1.1 Les spécificités de l'environnement de surface et de milieux géologique

2.1.1.1 Un site bien reconnu et caractérisé

Après plus de 20 ans de recherches et de caractérisations, l'Andra a acquis une base de connaissances scientifiques et technologiques importante et mature[12] sur l'environnement de surface et le milieu géologique (*e.g.* les formations géologiques, etc.) des zones d'implantation de surface et souterraines de l'INB Cigéo (cf. Encadré ci-dessous).

Cette base de connaissance a été régulièrement enrichie au fur et à mesure de l'avancement du centre de stockage Cigéo par des programmes de R&D successifs en réponse aux besoins de chaque jalon et sur la base des acquis des connaissances et des travaux de sûreté et de conception aux jalons antérieurs : recherche de site ⇨ faisabilité de principe (dossier 2005 (30)) ⇨ choix de la zone d'implantation de l'installation souterraine et des installations de surface (dossier 2009 (31)) ⇨ études d'avant-projet ⇨ études complémentaires ⇨ dossier d'options de sûreté (2016) (32, 33) ⇨ demande d'autorisation de création (2022) (cf. Chapitre 1.1 du présent document).

LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DE MEUSE/HAUTE-MARNE

Le site d'implantation de l'INB Cigéo se situe dans la bordure orientale du Bassin parisien dont l'histoire géologique est bien connue. Ce bassin sédimentaire est en forme de « cuvette » structuré par une succession de couches sédimentaires à dominante argileuse et carbonatée de plus de 1 800 mètres d'épaisseur à l'aplomb du site d'implantation du centre (cf. Figure 2-2). Le Bassin parisien est peu affecté par la tectonique, l'ensemble des structures étant inactif depuis *a minima* deux millions d'années et, plus probablement, depuis la dernière phase distensive oligocène, soit depuis les derniers 25 millions d'années. Il s'agit d'une zone remarquable de la plaque ouest européenne, stable et qui se distingue par son caractère pratiquement asismique.

Les travaux de l'Andra menés depuis plus de 20 ans (cartographie géologique, sismiques 2D-3D, forages, etc.) apportent des confirmations et précisions sur le cadre structural ainsi que la litho-stratigraphie et l'organisation spatiale des formations sédimentaires à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne. Ils ont permis entre autres de définir en 2005 la zone de transposition d'une superficie d'environ 250 km^2, exempte de failles, pour laquelle les propriétés de la formation du Callovo-Oxfordien sont similaires à celles déterminées sur le site du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

[12] La CNE considère dans son rapport d'évaluation n° 14 de juin 2020 (28) que *« l'Andra a établi le socle de connaissances nécessaire pour conduire le projet Cigéo, que la démonstration de la qualité du site a été faite, et que les options technologiques de stockage ont été consolidées. La maturité scientifique du projet Cigéo permet à présent d'envisager sur des bases solidement étayées son développement technologique en vue de l'autorisation de création »*. Elle considère également dans son rapport d'évaluation n° 16 de juin 2022 (29) que « *La Commission considère que l'Andra dispose actuellement des éléments scientifiques et techniques suffisants pour asseoir la démonstration de sûreté en vue de la demande d'autorisation de création (DAC). En outre, le projet Cigéo prévoyant un développement progressif, les futures avancées technologiques pourront y être intégrées. Toutes les conditions sont donc réunies pour un dépôt sans délai de la DAC.* ».

Les formations géologiques plus particulièrement concernées par les zones de stockage de l'INB Cigéo présentent un pendage régulier de 1° à 1,5° vers le nord-ouest, en direction du centre du Bassin parisien. La couche du Callovo-Oxfordien est encadrée par deux ensembles carbonatés massifs, faiblement aquifères (formation de l'Oxfordien carbonaté sus-jacent et formation du Dogger sous-jacent), non affleurants. Les couches à l'affleurement sur le site d'implantation de l'installation nucléaire Cigéo (Kimméridgien marneux dans les vallées et Calcaires du Barrois sur les plateaux) déterminent, par leur structure plane, leur pendage régulier et leurs différences de lithologie, un relief de côte caractéristique ; les zones de plateaux étant entaillées par des vallées profondes.

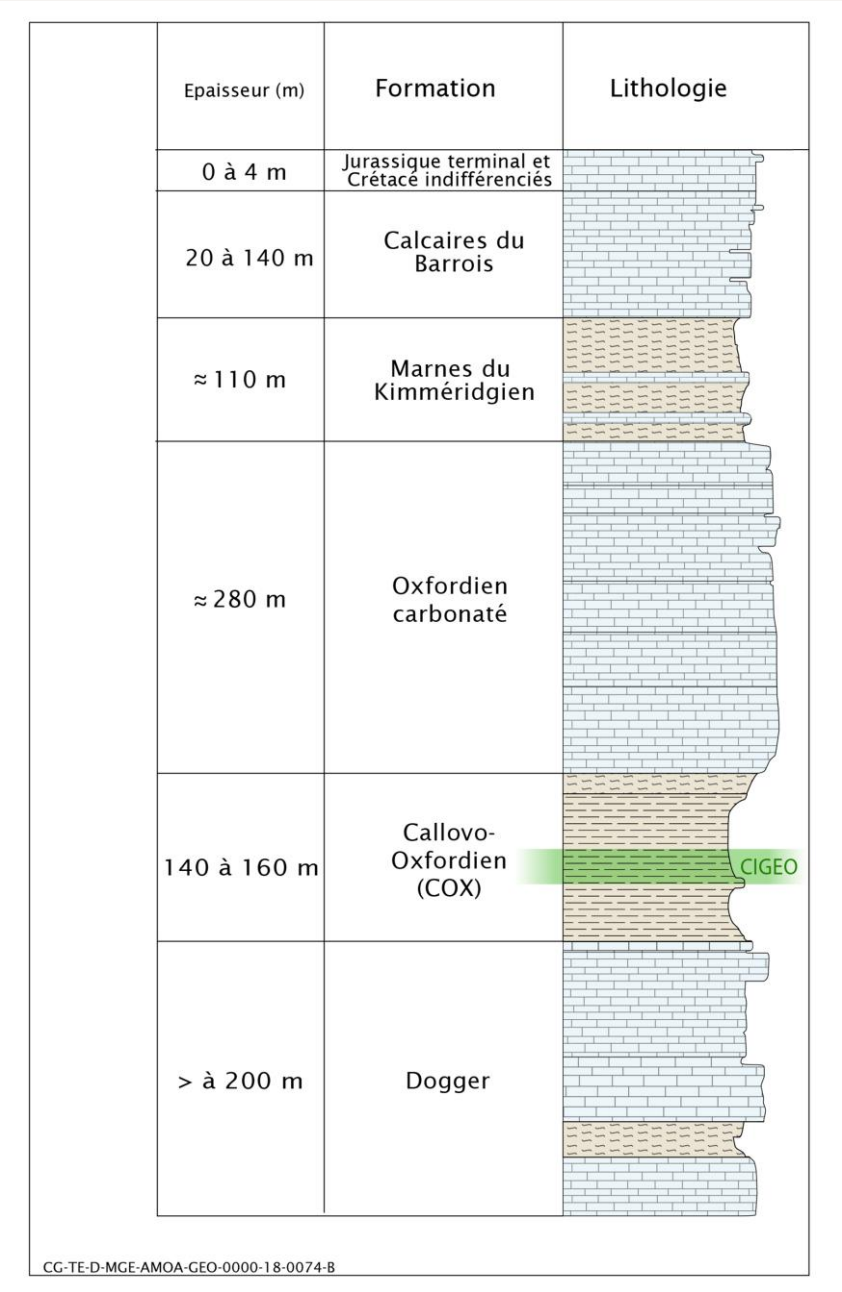


Figure 2-2 *Log stratigraphique et épaisseurs des formations géologiques rencontrées à l'aplomb du site d'implantation du centre de stockage Cigéo*

Ces connaissances ont été acquises par un ensemble de moyens divers et complémentaires, notamment la reconnaissance depuis la surface, les travaux en laboratoire de surface, le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et la simulation numérique.

Parmi ces moyens, le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et l'observatoire pérenne de l'environnement sont des outils privilégiés ayant permis d'acquérir des connaissances *in situ* sur l'environnement et les milieux géologiques (cf. Encadré ci-dessous).

LE LABORATOIRE DE RECHERCHE SOUTERRAIN DE MEUSE/HAUTE-MARNE ET L'OBSERVATOIRE PÉRENNE DE L'ENVIRONNEMENT : DES OUTILS AU SERVICE DES ACQUISITIONS DE CONNAISSANCES

Dans le cadre de la loi n° 1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs et précisant *« l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains* » (3) et après autorisation par le Gouvernement français, l'Andra a débuté en 2000 la construction d'un Laboratoire de recherche souterrain dans le secteur de Meuse/Haute-Marne.

En complément d'autres moyens (travaux de reconnaissance depuis la surface par forages et sismique 2D/3D, essais et analyses sur échantillons, simulation numérique, etc.), le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne est un outil privilégié permettant *in situ* (*i.e.* en conditions représentatives) l'observation et la mesure des propriétés du Callovo-Oxfordien, la roche hôte, la mise au point de techniques d'ingénierie en installation souterraine en lien avec les concepts de stockage et la surveillance future de l'installation nucléaire Cigéo, plus particulièrement l'installation souterraine et les alvéoles de stockage en incluant le Callovo-Oxfordien environnant (creusement/soutènement d'alvéoles de stockage et de galeries, ouvrages de fermeture, dispositifs d'exploitation, dispositifs de surveillance, etc.), le comportement des matériaux et des composants ouvragés, et le comportement du Callovo-Oxfordien face aux sollicitations attendues dans le stockage (thermique, mécanique, chimique, etc.).

Le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne représente actuellement environ 2 km de galeries souterraines cumulées exploitées à -490 mètres (niveau principal) et à -445 mètres (niche) de profondeur, implantées directement dans le Callovo-Oxfordien. Plus de 80 expérimentations scientifiques et/ou technologiques y sont ou y ont été menées.

Dans le cadre global du projet de centre de stockage Cigéo, l'Andra a par ailleurs mis en œuvre depuis 2009 un ensemble de moyens d'observation et de conservation d'échantillons de l'environnement sur une zone autour des installations de surface du centre de stockage Cigéo : l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE). L'objectif de l'OPE est de caractériser l'environnement de surface avant toute construction des installations de surface du centre de stockage Cigéo et de suivre son évolution sur la durée séculaire d'exploitation du centre.

Les dispositifs d'observation déployés dans le cadre de l'OPE sont composés à la fois de sites d'observation spécifiques permettant d'acquérir des données en continu (stations de mesure de la qualité des eaux, de l'air) et de suivis réguliers répartis sur la zone d'étude (réseau de mesure de la qualité des sols ou suivi de la biodiversité). Les nombreuses données acquises depuis 2007 regroupent à la fois des mesures des paramètres physiques et chimiques et des observations réalisées dans les différents milieux.

L'OPE ne s'inscrit pas dans le cadre de l'évaluation des impacts ou de la surveillance de l'environnement du projet global Cigéo au sens réglementaire mais plutôt dans une démarche innovante et responsable de l'Andra de connaissance et d'observation du territoire de Meuse/Haute-Marne, en regard de la spécificité du projet de centre de stockage Cigéo.

Ces connaissances agrégées permettent de disposer d'un modèle géologique et structural numérique bien établi, à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne, de la zone de transposition, du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA). Il fournit une représentation 3D des formations géologiques et de leurs principales caractéristiques en support aux études de conception et de dimensionnement des ouvrages et aux évaluations de sûreté (cf. Figure 2-3).

L'acquisition du corpus de connaissances s'inscrit dans le développement progressif de l'installation de stockage et permet ainsi de supporter le dossier de demande d'autorisation de création. Ce processus de développement progressif est un processus continu et se poursuivra tout au long de la vie du l'INB.

2.1.1.2 Des actions à mener en amont de la phase de construction initiale

La phase de conception initiale a permis d'acquérir les éléments concernant en particulier l'environnement et la conception, le dimensionnement et le fonctionnement de l'installation pour la tranche 1.

L'ensemble du corpus de connaissances acquis depuis le lancement des études sur le site de Meuse/Haute-Marne en 1994 permet ainsi de disposer d'une compréhension fine de l'environnement et des caractéristiques des formations géologiques concernées par le centre de stockage Cigéo (Calcaires du Barrois, Kimméridgien, Oxfordien carbonaté, Callovo-Oxfordien et Dogger).

Les actions relatives à l'environnement se poursuivent en particulier dans le cadre des suivis mis en place en support à l'étude d'impact (cf. Chapitre 2.1.2 du présent document).

Du fait des acquis, celles concernant les formations géologiques sont désormais fortement ciblées sur l'optimisation du stockage et l'amélioration continue des connaissances vis-à-vis des éléments retenus dans les évaluations de sûreté (réduction des marges, etc.), en lien avec une représentation plus intégrée du fonctionnement phénoménologique du stockage et de son environnement géologique (cf. Chapitres 2.1.3, 2.1.4 et 2.1.5 du présent document).

En parallèle de ces différentes actions, une démarche de veille et d'amélioration continue (optimisation, etc.) est maintenue sur l'environnement de surface et le milieu géologique en support aux réexamens périodiques qui seront réalisés pendant la phase de fonctionnement.

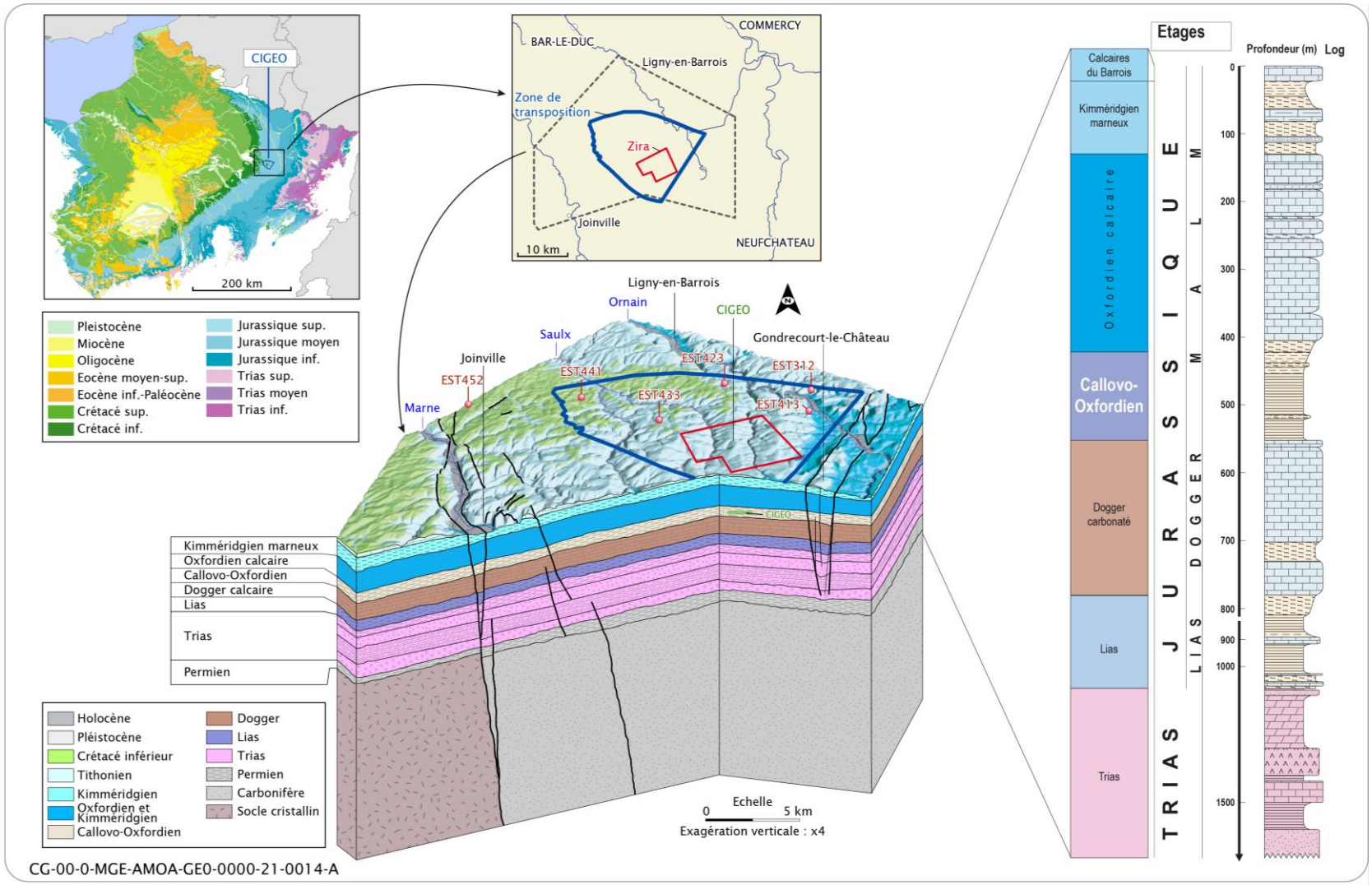


Figure 2-3 *Bloc géologique 3D à l'échelle de la zone de transposition et de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) avec un log géologique établi au niveau du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

2.1.2 L'environnement de surface

Parmi les éléments support au dossier de demande d'autorisation de création, ceux relatifs à l'environnement tiennent une place centrale (cf. Encadré ci-dessous).

L'ENVIRONNEMENT DE SURFACE

L'environnement de surface regroupe les milieux physiques, biologiques et humains.

Ils sont analysés au travers de différents facteurs qui comprennent, notamment, l'air, le climat, l'eau et les milieux aquatiques, le sol et le sous-sol, la faune, la flore, les milieux naturels, les équilibres biologiques, les paysages, le patrimoine culturel, le cadre de vie (bruit, odeurs, émissions lumineuses, etc.), l'hygiène, la santé, la sécurité et la salubrité publiques, les risques naturels ou technologiques, l'énergie, l'aménagement et la gestion du territoire.

En effet, concernant les éléments relatifs à l'environnement, la réglementation requiert l'établissement d'une étude d'impact du projet global Cigéo sur l'environnement (9) (cf. Encadré ci-dessous). Cette étude d'impact présente les études environnementales qui ont été réalisées afin (i) de connaître le territoire et son fonctionnement, (ii) d'identifier et évaluer, sur la base des informations relatives à la description du projet en cours de conception, les incidences notables potentielles de ce projet sur l'environnement, (iii) d'identifier les incidences négatives notables potentielles permettant par la suite de mener les actions permettant d'éviter, réduire ou compenser ces incidences (démarche ERC[13]) et (iv) de réaliser ces actions.

L'évaluation environnementale est un processus continu. À ce titre, l'évaluation environnementale, et donc l'étude d'impact qui en constitue la formalisation, est susceptible d'actualisations au fur et à mesure de l'avancement de l'élaboration du projet et des futures demandes d'autorisations. Ainsi, les mesures et les études environnementales se poursuivent sur le site au cours des différentes phases de vie de l'installation.

L'ÉTUDE D'IMPACT ET LES ACQUIS SUR L'ENVIRONNEMENT

L'étude d'impact est une étude réglementaire, fondée sur des analyses scientifiques et techniques, qui fait partie d'un processus global d'évaluation environnementale des effets d'un projet sur l'environnement (naturel, humain, patrimonial, etc.). Le processus d'évaluation environnementale est un outil d'aide à la décision qui tient compte de l'ensemble de la vie d'un projet (depuis sa construction, pendant son fonctionnement, son démantèlement et jusqu'à sa fermeture et sa surveillance).

Le déroulement des études environnementales, synthétisées dans l'étude d'impact, amène notamment à établir des analyses et investigations visant à connaître le territoire et son fonctionnement, afin d'en déterminer les enjeux et la sensibilité.

Cet « état initial de l'environnement » implique d'étudier les milieux de façon proportionnée aux enjeux. Les acquis relatifs à l'environnement de surface sont détaillés dans la pièce 6 « Étude d'impact » du projet global Cigéo du dossier de demande d'autorisation de création (9) et notamment au travers de son volume III « état initial de l'environnement et facteurs susceptibles d'être affectés par le projet ».

L'étude d'impact présente ainsi un certain nombre d'éléments de caractérisation des différents compartiments de l'environnement. Elle présente également le programme de surveillance de l'environnement.

[13] Éviter-Réduire-Compenser

Par exemple, concernant le sujet des eaux superficielles, les données hydrologiques sont d'ores et déjà capitalisées régulièrement grâce aux équipements disponibles (stations, capteurs, etc.) et aux campagnes de mesures faites sur le terrain. Des campagnes de jaugeages (débit, température, conductivité, pH) sont actualisées sur la Saulx, l'Orge, la Bureau et l'Ormançon.

La caractérisation des cours d'eau et la bonne connaissance de l'état initial des milieux (hydrologique et hydro-morphologique notamment) se poursuivent en termes de quantification.

En compléments, un déploiement de stations hydrauliques complémentaires et de sondages piézométriques additionnels des cours d'eau concernés par le projet sera effectué. Ceci permettra notamment de compléter la caractérisation des cours d'eau et des zones humides avérées.

2.1.3 Les Calcaires du Barrois

Les installations de surface de l'INB (en zone descenderie et zone puits) sont situées *pro parte* dans la formation aquifère des Calcaires du Barrois, celle-ci constituant également la principale formation géologique à l'affleurement dans les environs du site d'implantation de ces zones. Le réseau hydrographique local se développe en connexion avec les eaux souterraines qui s'écoulent dans cette formation.

La conception des installations de surface a intégré l'évaluation des incidences sur l'eau concernées pour l'aquifère des Calcaires du Barrois. Ces incidences sont relatives aux eaux souterraines (incidences sur les captages d'adduction d'eau potable de l'aire d'étude éloignée[14] ou sur les forages/puits à usage agricole et industriel, incidences sur la zone humide de la vallée de l'Orge) et aux eaux superficielles de par leurs interrelations (incidences sur la qualité des cours d'eau, les régimes d'écoulement des ruisseaux concernés, risque inondation, etc.).

Fondés sur l'état des connaissances sur la caractérisation et le fonctionnement hydrogéologique des Calcaires du Barrois au stade du dossier de demande d'autorisation de création, les travaux de conception et d'évaluation des incidences se sont appuyés sur des modélisations et simulations numériques. Elles ont suivi une démarche prudente et enveloppe, afin de tenir compte des incertitudes de connaissances et de l'utilisation d'une approche de représentation de type milieu poreux continu équivalent des Calcaires du Barrois, formation de type karstique (cf. Encadré ci-dessous).

Dans le cadre de l'acquisition continue des connaissances, afin de conforter les différents modèles de représentation et de comportement hydrogéologique retenus dans les évaluations des incidences environnementales des installations de surface ainsi que pour la conception et le dimensionnement de ces installations (cf. Chapitre 2.3.2.1 du présent document), des études se poursuivent sur la caractérisation et la modélisation hydrogéologique des Calcaires du Barrois (cf. Encadrés ci-dessous), sans préjuger des difficultés inhérentes à une représentation précise de ce type de formation karstique.

Les études visent en particulier à conforter et préciser la représentation locale des écoulements d'eau et de transport de solutés dans la formation des Calcaires du Barrois où seront implantées les installations de surface, en particulier la zone descenderie, au regard de la maîtrise et de la limitation des incidences potentielles.

[14] L'aire d'étude éloignée, qui varie en fonction des facteurs de l'environnement, correspond à la zone permettant d'appréhender les effets potentiels ou éloignés directs et indirects secondaires du projet global Cigéo. Cette aire d'étude a été définie en tenant compte de l'ensemble des incidences potentielles que pourraient avoir les installations, ouvrages, travaux et activités d'après les connaissances disponibles (9).

LES CALCAIRES DU BARROIS

La formation des Calcaires du Barrois, dont l'épaisseur peut atteindre 150 mètres lorsqu'elle est complète, est largement dominante à l'affleurement au droit de la zone d'installation des ouvrages souterrains (ZIOS) et sur la zone descenderie. L'épaisseur préservée varie géographiquement sous les effets combinés du pendage vers le nord-ouest (épaisseur préservée augmentant dans cette direction) et de l'érosion du relief actuel (épaisseur préservée de la formation plus importante sur les points hauts). La géométrie de cette formation est précisément établie par modélisation calée à partir de nombreux forages réalisés sur et à proximité des zones d'intérêts (zone d'implantation des ouvrages souterrains, zone puits et zone descenderie). Les intervalles plus calcaires rencontrés dans les Calcaires du Barrois ont subi une fracturation et une karstification parfois intenses qui permettent une infiltration et des circulations rapides de l'eau ainsi que des pertes dans les cours d'eau qui les traversent.

Les Calcaires du Barrois constituent un système aquifère de type karstique structuré en trois unités aquifères (Calcaires sublithographiques, Calcaires de Dommartin et Calcaires cariés) qui s'écoulent sur des formations semi-perméables (Marnes du Kimméridgien, Pierre Châline et Oolithe de Bure), avec à la base les marnes kimméridgiennes constituant une barrière très peu perméable. Cette structuration gouverne les grands schémas d'écoulement de l'eau dans les Calcaires du Barrois.

Les écoulements sont ainsi organisés dans chacune des trois unités aquifères selon l'organisation générale de la géologie (pendage, fractures, flexures, plissements, etc.) locale et régionale, la fracturation de direction nord nord-ouest et le réseau de conduits karstiques qui s'est développé par dissolution des calcaires le long du réseau de fractures existant. Des conduits karstiques verticaux et les connexions avec le réseau hydrographique de surface peuvent localement mettre en relation ces niveaux aquifères.

LE COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES CALCAIRES DU BARROIS

Depuis le début des études sur le site Meuse/Haute-Marne en 1994, des études environnementales et hydrogéologiques de subsurface (suivis piézométriques, analyses géochimiques des eaux, mesures de débits dans les cours d'eau, etc.) ont été réalisées. Ces études ont été menées en premier lieu à l'échelle de la zone de transposition puis se sont recentrées sur une zone à proximité du centre de Meuse/Haute-Marne.

En 2007, la création de l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) a conduit à la mise en place progressive d'un réseau de suivi de la qualité des eaux (de surface et souterraines) sur un territoire d'environ 900 km^2.

À partir de 2010, les études se sont poursuivies sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA), en particulier avec la réalisation d'une campagne sismique 3D haute résolution et depuis 2015 sur l'emprise de la zone descenderie à l'occasion des campagnes géotechniques en support à la conception et la construction des installations de surface du centre de stockage Cigéo (mise en place d'un réseau de suivi piézométrique).

Ces travaux de caractérisation des Calcaires du Barrois ont permis de construire à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne un modèle de représentation géologique et hydraulique du système aquifère karstique.

Les incidences du fonctionnement hydrogéologique des Calcaires du Barrois sur les eaux souterraines et superficielles, de par leurs interrelations et les mesures associées, sont présentées dans la pièce 6 « Étude d'impact du projet global Cigéo de la demande d'autorisation de création » (9).

Ces études sont rassemblées dans un programme dit programme « Calcaires du Barrois », décliné avant la phase de construction initiale des installations, visant à améliorer la représentation du fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème des Calcaires du Barrois (eaux souterraines et interrelations avec les eaux superficielles) avec le développement de modèles hydrogéologiques globaux et distribués couplés à l'acquisition de données de caractérisation complémentaires. Il s'agit en particulier de conforter les connaissances :

- de l'état initial multi-échelles spatiales de la formation géologique (*a minima* les aires d'étude éloignée et immédiate[15] de l'étude d'impact) ;
- des propriétés hydrodynamiques et des écoulements dans le système karstique aux différentes échelles spatiales et temporelles pertinentes pour conforter l'évaluation des incidences et la conception/dimensionnement des installations de surface.

Ce programme met en œuvre des travaux de caractérisation *in situ* par forages, des travaux de conceptualisation/modélisation des écoulements, des développements numériques spécifiques à l'implémentation des modèles de comportement hydrogéologique spécifiques au caractère karstique de l'aquifère des Calcaires du Barrois et aux échelles spatiales et temporelles concernées, et des études appliquées sur le comportement hydrogéologique de l'aquifère à l'état initial et du fait de la réalisation des installations de surface à ces différentes échelles spatiales et temporelles. L'intégration des données de caractérisation de natures diverses (géologiques, géophysiques, hydrologiques et hydrogéologiques) permet la cohérence du développement des modèles hydrogéologiques conceptuels des Calcaires du Barrois.

2.1.4 Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien

Le corpus de connaissances acquis par l'Andra suite à plus de vingt années d'études des formations géologiques sus- et sous-jacentes du Callovo-Oxfordien se traduit par une connaissance approfondie des caractéristiques géométriques et des propriétés de l'Oxfordien carbonaté, des marnes du Kimméridgien et du Dogger (cf. Encadré ci-dessous).

LES FORMATIONS SUS- ET SOUS-JACENTES DU CALLOVO-OXFORDIEN

Les formations sus- et sous-jacentes du Callovo-Oxfordien sont respectivement le Kimméridgien et l'Oxfordien carbonaté et le Dogger.

L'épaisseur des Marnes du Kimméridgien est de l'ordre de la centaine de mètres sur la zone de transposition. À l'échelle de cette zone, cette superposition ne présente qu'une variabilité verticale de quelques mètres. La géométrie et les propriétés de cette formation sont bien représentées par le modèle géologique.

L'épaisseur de l'Oxfordien carbonaté augmente faiblement d'est en ouest sur la zone de transposition avec une épaisseur moyenne sur la ZIRA investiguée par la sismique 3D d'environ 280 mètres. À l'aplomb de la zone descenderie et sur le tracé des liaisons surface-fond (descenderies et puits), l'Oxfordien carbonaté présente quatre ensembles de niveaux poreux séparés par des intervalles marneux appartenant à la série grise. Ces niveaux sont en partie isolés d'un point de vue hydrogéologique. La réduction d'épaisseur des niveaux marneux de la série grise permet, au nord-ouest sur la zone de transposition, la connexion hydrogéologique entre ces niveaux poreux.

La formation du Dogger est l'encaissant inférieur de la formation du Callovo-Oxfordien. Sa profondeur évolue sur la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) (hors descenderies) entre environ 510 mètres et 680 mètres.

[15] L'aire d'étude immédiate correspond à la zone d'étude permettant d'appréhender les effets directs d'emprise des ouvrages et installations du projet global Cigéo ainsi que par les perturbations majeures liées aux travaux et activités (9).

Dans le cadre de la démarche d'amélioration continue des connaissances et de leur intégration progressive dans les modèles retenus dans les évaluations de sûreté, les actions relatives à la poursuite de la caractérisation du comportement hydrogéologique de ces différentes formations concernent principalement :

- l'étude du comportement hydrogéologique de l'Oxfordien carbonaté afin de conforter le modèle de comportement hydrogéologique des aquifères encaissants à l'actuel (cf. Chapitre 2.1.4.1 du présent document) ;
- la confortation des modèles d'écoulements à grande échelle sur le million d'années (cf. Chapitre 2.1.4.2 du présent document).

2.1.4.1 Le comportement hydrogéologique des formations encaissantes du Callovo-Oxfordien

Les compléments de caractérisation support à la confortation du modèle de comportement hydrogéologique des formations encaissantes du Callovo-Oxfordien retenu dans les évaluations de sûreté[16] s'inscrivent dans la continuité des développements menés ces dernières années sur les modèles hydrogéologiques (cf. Encadré ci-dessous), en lien avec l'acquisition de nouvelles données et mesures de terrain à proximité du centre de stockage Cigéo.

LE COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES FORMATIONS ENCAISSANTES DU CALLOVO-OXFORDIEN

Le modèle hydrogéologique de référence à l'actuel retenu dans les évaluations de sûreté intègre l'ensemble des connaissances disponibles sur l'état actuel des formations au droit des ouvrages souterrains et, notamment, celles des formations encaissantes du Callovo-Oxfordien (horizons poreux et marnes de la série grise dans l'Oxfordien carbonaté, réseaux karstiques de l'Oxfordien carbonaté, calcaires récifaux et niveaux poreux dans le Dogger, failles et fractures, zone de fracturation diffuse).

Les paramètres hydrauliques de ce modèle ont été calibrés de manière à reproduire le plus fidèlement possible les données de niveaux piézométriques mesurés à l'échelle du secteur dans les aquifères de l'Oxfordien carbonaté et du Dogger (avec une erreur inférieure à 2 mètres sur 23 forages).

Pour la suite, Il s'agira, à proximité de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), de caractériser ces formations d'un point de vue de leurs propriétés géologiques et morphologiques ainsi qu'hydrodispersives. Cette caractérisation sera réalisée dans le cadre de la campagne de forages profonds ZBS (pour ZIOS *Boreholes Survey*). Elle permettra ainsi de conforter les propriétés hydrodynamiques et hydro-dispersives des formations sous- et sus-jacentes du Callovo-Oxfordien (avec une attention particulière portée aux horizons poreux de l'Oxfordien carbonaté) et plus particulièrement du Kimméridgien marneux et de la série grise marneuse de l'Oxfordien (niveau imperméable jouant un rôle dimensionnant dans les voies de transferts vers les exutoires pour les évaluations de sûreté après-fermeture).

Le modèle hydrogéologique retenu dans les évaluations de sûreté sera ainsi mis à jour avec les données obtenues qui permettront de préciser les propriétés des formations (profondeur et épaisseurs, paramètres hydrauliques) dans les modèles géologique et hydrogéologique. Notamment, un travail important sera mené sur le Dogger, formation aquifère encaissante sous-jacente au Callovo-Oxfordien, afin de préciser les propriétés hydrauliques et l'extension latérale des niveaux poreux et perméables dans le modèle hydrogéologique.

La mise à jour de ce modèle se poursuivra avec la reconnaissance à l'avancement lors de la phase de construction initiale de l'installation souterraine de l'installation nucléaire Cigéo et la prise en compte du comportement hydrogéologique des formations géologiques traversées par les liaisons surface-fond en lien avec la conception de leurs revêtements (étanchéité, etc.).

[16] La CNE dans son rapport d'évaluation n° 6 de novembre 2012 (34) considère que : « *dans sa situation de 2012, le modèle hydrogéologique est parvenu à un degré de maturité très élevé. Les résultats des simulations de l'écoulement dans l'Oxfordien et le Dogger permettent d'affiner les conclusions du dossier 2005 sans les remettre fondamentalement en cause.* ».

2.1.4.2 Les modèles d'évolution hydrogéologiques à grande échelle sur le million d'années

Dans le cadre de la démarche d'amélioration continue des connaissances et des modèles retenus dans la démonstration de sûreté, l'évolution hydrogéologique au cours du prochain million d'années sera également progressivement mise à jour en tant que de besoin (cf. Encadré ci-dessous).

LES MODELES HYDROGÉOLOGIQUES À GRANDE ÉCHELLE SUR LE MILLION D'ANNÉES

Le modèle hydrogéologique de référence à l'actuel (cf. Encadré ci-dessus) sert d'état initial pour les simulations hydrogéologiques sur le prochain million d'années. Ces simulations hydrogéologiques prennent par ailleurs en compte : (i) le champ des évolutions géodynamiques internes possibles (processus de surrection et d'érosion des formations géologiques) depuis le modèle le plus vraisemblable (dit « phénoménologique » avec un taux de surrection/érosion « *best-estimate* » en lien avec les taux régionaux passés) et (ii) une évolution géodynamique interne maximaliste avec un taux surrection/érosion à l'équilibre (plus forte érosion des formations géologiques).

Ce modèle maximaliste de l'évolution géodynamique interne conduit très localement (au niveau de la vallée de l'Ornain) à une mise à l'affleurement de l'Oxfordien carbonaté, formation encaissante sus-jacente du Callovo-Oxfordien, au cours du prochain million d'années, ce qui draine une partie (limitée) des trajectoires hydrauliques depuis la ZIOS.

Outre la prise en compte de l'affinement du modèle de comportement hydrogéologique à l'actuel des formations encaissantes du Callovo-Oxfordien, les modélisations de l'évolution hydrogéologique au cours du prochain million d'années intègreront par la suite en tant que de besoin, en plus des évolutions géodynamiques interne phénoménologique et maximaliste, les évolutions de connaissances sur les effets liés à une évolution climatique naturelle et une évolution climatique perturbée (rejets anthropiques importants de gaz à effet de serre) dans le cadre des travaux nationaux et internationaux sur le réchauffement climatique global.

En effet, la prise en compte de l'évolution climatique peut être de nature à entraîner une modification des écoulements au cours du prochain million d'années, en particulier par la présence de pergélisols bloquant les écoulements au droit des aires de recharge et entraînant ainsi une réduction des vitesses d'écoulement et de transfert des radionucléides dans les aquifères encaissants du Callovo-Oxfordien.

2.1.5 La couche du Callovo-Oxfordien

L'Andra, grâce à plus de 20 ans d'études de caractérisation de la couche géologique du Callovo-Oxfordien, a une connaissance approfondie et robuste sur ce composant important pour la protection (CIP). Ces connaissances donnent une représentation d'ensemble cohérente du Callovo-Oxfordien, notamment sur les plans sédimentologique, structural, hydrogéologique, géomécanique, géochimique et de transfert des solutés (cf. Encadré ci-dessous).

Ces éléments de caractérisation du milieu géologique et de son évolution ont été acquis par des mesures indirectes (acquisitions sismiques) et des études géologiques (forages, cartographie) qui ont été menées à des distances allant jusqu'à plusieurs kilomètres des futures installations.

LE CALLOVO-OXFORDIEN

Le Callovo-Oxfordien est la formation géologique hôte dans laquelle sont implantées les quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs de l'INB Cigéo.

La couche du Callovo-Oxfordien a une épaisseur moyenne d'environ 150 mètres sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA). Elle repose sur la formation du Dogger et est surmontée depuis son toit, de bas en haut, par l'Oxfordien carbonaté, les Marnes du Kimméridgien et les Calcaires du Barrois en surface. La gamme de profondeurs pour le toit de la couche du Callovo-Oxfordien est comprise entre environ 340 et 530 mètres du fait de son pendage de l'ordre du degré vers le nord-ouest.

La couche du Callovo-Oxfordien est principalement constituée de minéraux argileux ainsi que de minéraux carbonatés et de quartz. La variabilité verticale lithostratigraphique (*i.e.* minéralogique) ont conduit à une décomposition de la formation en trois sous-unités : de bas en haut, une sous-unité à dominante argileuse (dite « unité argileuse » ou UA) globalement homogène, une unité de transition (UT) et une unité silto-carbonatée (USC) qui marque l'installation progressive des plateformes carbonatées de l'Oxfordien carbonaté sus-jacent. Toutes ces sous-unités présentent par ailleurs une grande homogénéité latérale. Cette variabilité minéralogique ne se traduit pas néanmoins par une variabilité significative de la majorité des propriétés physico-chimiques du Callovo-Oxfordien à la base de la capacité de confinement des radionucléides ou de limitation de leur transfert comme la perméabilité, la diffusion, la capacité de rétention ou la chimie de l'eau porale. En revanche, les propriétés mécaniques et de conductivité thermique varient avec la composition minéralogique.

De plus, le Callovo-Oxfordien présente les caractéristiques principales suivantes :

- une absence d'hétérogénéités structurales ;
- une grande continuité latérale et un pendage régulier ;
- un contexte géodynamique peu actif et pratiquement asismique ;
- un état de contraintes naturelles anisotrope ;
- des propriétés remarquables de très faible transfert des fluides (eau liquide et gaz exprimé) et des solutés ;
- une absence de ressources exceptionnelles (matériaux de carrière, ressources minérales, géothermie, ressource en eau) au niveau de la zone de transposition.

Ainsi, les études envisagées sur la couche du Callovo-Oxfordien s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue de la connaissance acquise et ont pour objet en particulier de conforter les propriétés et les modèles de comportement des argilites du Callovo-Oxfordien retenus en particulier dans l'évaluation de sûreté après fermeture (*e.g.* profondeur de la couche des argilites du Callovo-Oxfordien, épaisseur de la formation, etc.), dans la conception/dimensionnement des ouvrages souterrains de l'installation (*e.g.* dimensionnement mécanique des ouvrages de l'installation de stockage (revêtement/soutènement, carrures, etc.), ainsi que dans le dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique (température/THM) des entraxes entre les alvéoles du quartier pilote HA, etc.).

Ces objectifs conduisent à la réalisation de deux types d'études selon qu'elles concernent le Callovo-Oxfordien sain et endommagé mécaniquement en champ proche des ouvrages souterrains. Il s'agit d'études portant sur :

- les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien sain (*i.e.* non perturbée) (géométrie de la couche, minéralogie, propriétés THM, etc.), les modèles de comportement et les domaines de valeurs des paramètres des modèles (cf. Chapitre 2.1.5.1 du présent document) ;
- les caractéristiques de la zone endommagée mécaniquement du Callovo-Oxfordien autour des ouvrages souterrains (extension, propriétés, etc.), les modèles de comportement et les domaines de valeurs des paramètres des modèles (cf. Chapitre 2.1.5.2 du présent document).

En dernier lieu, les études relatives au Callovo-Oxfordien portent sur la poursuite du développement de dispositifs géophysiques de surveillance non destructive de la roche (cf. Chapitre 2.1.5.3 du présent document).

2.1.5.1 Une amélioration continue des connaissances des propriétés du Callovo-Oxfordien non perturbé

Comme indiqué ci-dessus, les connaissances actuelles concernant les propriétés et les modèles de comportement du Callovo-Oxfordien proviennent de données acquises depuis la surface (campagnes de sismiques et forages) et du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Elles présentent pour certaines des incertitudes résiduelles qui ont été prises en compte en particulier par des approches prudentes enveloppes (*e.g.* conservatives).

Il s'agit de conforter ces acquis et de viser à réduire ces incertitudes et, ainsi, de conforter les hypothèses conservatives retenues dans la démonstration de sûreté et le dimensionnement des ouvrages par la réalisation de mesures à proximité de la ZIOS et *in situ* lors du creusement des ouvrages, voire de permettre une optimisation de la conception et du dimensionnement. En parallèle, des études se poursuivent au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Les actions portant sur la confortation des connaissances des caractéristiques intrinsèques du Callovo-Oxfordien sain concernent principalement la géométrie de la roche hôte (cf. Chapitre 2.1.5.1.1 du présent document), son comportement sous chargement de gaz (cf. Chapitre 2.1.5.1.2 du présent document), ses propriétés thermo-hydro-mécaniques (THM) et thermiques (cf. Chapitre 2.1.5.1.3 du présent document), la surpression naturelle (cf. Chapitre 2.1.5.1.4 du présent document) et le transfert de radionucléides et de toxiques chimiques (cf. Chapitre 2.1.5.1.5 du présent document).

2.1.5.1.1 La géométrie du Callovo-Oxfordien

Concernant les paramètres géométriques du Callovo-Oxfordien, dans le cadre de la définition (implantation) de l'architecture de l'installation souterraine (cf. Encadré ci-dessous), il s'agit de préciser les profondeurs du toit et du mur du Callovo-Oxfordien et celles des surfaces internes caractéristiques de ses différentes sous-unités géologiques, son épaisseur et celle entre le niveau des ouvrages et les limites (toit et mur) de la formation au regard des incertitudes résiduelles.

LE MODÈLE GÉOMETRIQUE DE LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

Un modèle géologique 3D du Callovo-Oxfordien a été développé progressivement depuis le début des années 2000, au fur et à mesure des campagnes de reconnaissance réalisées. Avec la campagne sismique 3D haute-résolution réalisée en 2009-2010 sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie, ce modèle a atteint un niveau de maturité important, en termes de détails et de précision, en regard des pratiques usuelles.

Ce modèle géologique 3D agrège ainsi de manière cohérente toutes les données acquises et les interprétations associées, à l'échelle de la zone de transposition (forages, échantillons, mesures géophysiques) et du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Il fournit le meilleur niveau de connaissance possible sur la géométrie 3D du Callovo-Oxfordien sur la ZIOS, en termes de profondeur et d'épaisseur de la couche et des différentes unités géologiques qui la composent avec les incertitudes associées à ces estimations.

Au sein de la ZIOS, les profondeurs des argilites du Callovo-Oxfordien (toit, mur et unités géologiques) sont ainsi estimées avec une incertitude de ± 10 m. L'incertitude sur l'épaisseur totale est estimée inférieure à la dizaine de mètres. Les grandes tendances d'évolution montrées par les modèles géologiques précédents (fondés uniquement sur les données aux forages) sont confirmées.

Les actions mises en place afin de conforter les connaissances acquises et réduire les incertitudes résiduelles associées se déclinent principalement au travers de deux plans d'actions :

- en amont de la phase de construction initiale : la campagne de forages profonds ZBS au cours de laquelle ces acquisitions seront réalisées grâce d'une part à des mesures sismiques et, d'autre part, des prélèvements issus de quatre plateformes de forages. Cette campagne de forages permettra ainsi de conforter le modèle géologique 3D du Callovo-Oxfordien (géométrie, pétrophysique, valeurs des propriétés intrinsèques THM, hydrauliques et de transfert, champ de contraintes naturelles) et des différentes formations géologiques sus-jacentes au Callovo-Oxfordien (Marnes du Kimméridgien et Oxfordien carbonaté) pour quantifier plus précisément les marges prudentes retenues pour la conception de l'installation souterraine ;
- au cours de la phase de construction initiale : le programme de reconnaissance à l'avancement qui sera mis en place lors du fonçage des liaisons surface-fond puis lors du creusement des ouvrages fond dont un des volets porte sur la caractérisation locale *in situ* des propriétés intrinsèques du Callovo-Oxfordien sain (*e.g.* non perturbé). Ce volet consiste entre autres à réaliser des forages en avancée des fronts de creusement, qui permettront de conforter les propriétés intrinsèques du Callovo-Oxfordien *in situ*.

2.1.5.1.2 Le comportement du Callovo-Oxfordien sous chargement de gaz

L'évolution phénoménologique de l'installation souterraine après fermeture est caractérisée par un transitoire hydraulique-gaz avant que le stockage ne soit totalement saturé par l'eau du Callovo-Oxfordien et qu'un état d'équilibre hydraulique saturé s'établisse dans l'installation souterraine et le Callovo-Oxfordien environnant.

Ce transitoire est lié à la génération d'hydrogène, principalement par la corrosion en conditions anoxiques des divers composants métalliques contenus dans le stockage et, dans une moindre mesure, par la radiolyse des composants organiques contenus dans le stockage et celle de l'eau. Ce transitoire est lent du fait des lentes cinétiques de corrosion et de la faible migration de l'hydrogène dans le stockage (par convection sous forme gaz) et dans le Callovo-Oxfordien (par diffusion sous forme dissoute). Il se traduit par une montée de la pression du gaz exprimé dans l'installation souterraine, l'atteinte d'un maximum de pression après quelques dizaines de milliers d'années, puis une diminution de la pression en lien notamment avec la saturation progressive de toute l'installation souterraine.

La conception prend en compte l'existence de cette pression de gaz transitoire par des exigences sur les ouvrages de fermeture visant à garantir la préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien. Il s'agit plus particulièrement de limiter la pression maximale de gaz et d'exclure le risque d'une fracturation en grand du Callovo-Oxfordien par le gaz en fonctionnement normal.

Sur la base du socle de connaissances scientifiques et technologiques acquis progressivement depuis plus de 20 ans et enrichi à chaque grand jalon de développement du centre de stockage Cigéo (cf. Encadré ci-dessous), il est retenu la conception d'ouvrages de fermeture (scellements et remblais) « passants au gaz » (cf. Chapitre 4.2.2.2 du présent document), favorisant le transfert du gaz exprimé et permettant de limiter la valeur de la pression maximale d'hydrogène à une valeur significativement inférieure à celle de la fracturation en grand du Callovo-Oxfordien (retenue de manière prudente comme la contrainte mineure dans le Callovo-Oxfordien au niveau de la ZIOS (cf. Encadré ci-dessous)).

LE TRANSITOIRE HYDRAULIQUE-GAZ EN APRES FERMETURE

Le transitoire hydraulique-gaz en après fermeture de l'installation souterraine de l'INB Cigéo résulte de la production d'hydrogène principalement par la corrosion anoxique des matériaux métalliques utilisés dans les différents composants ouvragés et, dans une moindre mesure, par la radiolyse de certains déchets MA-VL (polymères, boues bitumées, matrices cimentaires, etc.).

Il a fait l'objet d'évaluations systématiques à chaque grand jalon de développement du projet en s'appuyant sur le développement afférent d'un socle de connaissances scientifiques et technologiques relatif à la production, au transfert et à la consommation de l'hydrogène, en mettant en jeu des simulations numériques jusqu'à l'échelle de l'installation souterraine et le milieu géologique environnant en grand, et en incluant des analyses de sensibilité afin de couvrir les variabilités et incertitudes résiduelles de toutes natures à chaque jalon.

L'ensemble de ces évaluations montre un comportement similaire, même pour des sensibilités testant les limites des gammes phénoménologiquement disponibles, ce qui en conforte la robustesse vis-à-vis des pressions maximales de gaz atteintes dans le stockage.

Le schéma général du transitoire hydraulique-gaz est le suivant :

- du fait de la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et des propriétés élevées de rétention capillaire des argilites, l'hydrogène produit ne peut pas pénétrer sous forme gaz dans le réseau poral du Callovo-Oxfordien au niveau de pression de gaz atteint ;
- la majorité de l'hydrogène produit se dissout progressivement dans les eaux du Callovo-Oxfordien à partir de tous les ouvrages de l'installation souterraine du fait des grandes surfaces d'échange de l'installation souterraine avec le Callovo-Oxfordien. Cet hydrogène dissous migre par diffusion dans le Callovo-Oxfordien, de manière lente et diluée dans l'espace du fait de la faible diffusion des solutés dans le Callovo-Oxfordien ;
- la combinatoire entre la production d'hydrogène et la lente migration dans le Callovo-Oxfordien à l'état dissous conduit cependant à la génération d'une phase gazeuse et à une montée transitoire de la pression du gaz. Cette pression, de l'ordre de 7 MPa à 7,5 MPa à son maximum quelques dizaines de milliers d'années après-fermeture, reste inférieure de plusieurs MPa à la pression de fracturation au gaz dans la formation du Callovo-Oxfordien (contrainte naturelle minimale) ;
- l'hydrogène, présent sous forme gazeuse dans les ouvrages de l'installation souterraine, migre vers les ouvrages de liaison surface-fond du fait d'ouvrages de fermeture « passants » au gaz. Pour la même raison, les différentiels de pression de gaz sont relativement faibles entre zones de stockage, de l'ordre du MPa au plus, et s'homogénéisent à l'intérieur de l'installation souterraine, de sorte que les flux de gaz dans l'installation souterraine sont faibles. Ils s'organisent des zones de stockage vers les liaisons surface-fond puis vers l'encaissant supérieur lorsque la pression de gaz dépasse environ 5 MPa (soit environ 1 MPa de plus que la pression d'eau dans l'Oxfordien carbonaté) ;
- les quantités d'hydrogène sortant du Callovo-Oxfordien dans les formations géologiques sus-jacentes (Oxfordien carbonaté) et sous-jacentes (Dogger), soit sous forme dissoute *via* le Callovo-Oxfordien (au maximum quelques milliers de moles par an vers une centaine de milliers d'années après fermeture), soit sous forme gazeuse *via* les ouvrages d'accès (au maximum quelques dizaines de milliers de moles par an à environ une dizaine de milliers d'années après fermeture), sont très faibles et n'entraînent pas une désaturation de ces formations. L'hydrogène sortant du Callovo-Oxfordien migre dans les formations géologiques sus- et sous-jacentes à l'état dissous où il se dilue spatialement et temporellement ;
- ce transitoire hydraulique-gaz dure environ plusieurs centaines de milliers d'années avant retour à un état d'équilibre hydraulique saturé dans l'installation souterraine et le Callovo-Oxfordien environnant.

LE COMPORTEMENT DU CALLOVO-OXFORDIEN SOUS CHARGEMENT DE GAZ

L'Andra et ses homologues, notamment européens, ont développé des programmes de R&D propres et en commun afin de bien comprendre et représenter les processus physico-chimiques associés à la production, la consommation et la migration des gaz dans les milieux argileux (roche hôte argileuse et composants ouvragés à base d'argiles, par exemple les scellements), sous forme dissoute ou sous forme gaz. L'objectif a été de disposer de modèles robustes et de domaines de valeurs de paramètres associés bien établis pour évaluer de manière robuste le transitoire hydraulique-gaz, ses grands traits et ses grandeurs caractéristiques dont la pression maximale de gaz. Les travaux ont été menés à plusieurs échelles spatiales de manière à dégager une vision cohérente des processus et s'assurer de l'échelle d'applicabilité des modèles de représentation. Ces travaux ont comporté des essais sur échantillons carottés et des expérimentations dans des Laboratoires de recherche souterrains, comme celui de Meuse/Haute-Marne dans le Callovo-Oxfordien, afin notamment d'être en mesure de vérifier la cohérence entre les comportements observés sur échantillons et ceux observés à plus grande échelle et en conditions *in situ*.

Le programme de R&D mis en œuvre par l'Andra a ainsi permis (i) de préciser les valeurs des paramètres des modèles de transfert du gaz dans le Callovo-Oxfordien non endommagé et endommagé (diffusion du gaz dissous, perméabilités à l'eau et au gaz, courbes de rétention capillaire, pression d'entrée de gaz, etc.), (ii) de préciser le domaine de validité du modèle de transfert diphasique classique (loi de Darcy généralisée pour chaque phase, eau liquide et gaz exprimé) dans les milieux argileux, en particulier les roches argileuses, (iii) d'estimer les conditions pour la fracturation au gaz du Callovo-Oxfordien (pression de gaz en fonction des contraintes mécaniques, etc.) et (iv) d'évaluer les effets d'un éventuel endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien sur les transferts d'eau, de gaz et de solutés.

En parallèle, des outils de simulation numérique ont été développés intégrant l'ensemble des processus d'écoulement d'eau liquide et transfert de gaz et permettant de mener des évaluations du transitoire hydraulique-gaz aux différentes échelles spatiales et temporelles pertinentes, notamment à l'échelle du stockage en grand et du milieu géologique environnant, en particulier la formation hôte du Callovo-Oxfordien, et sur plusieurs centaines de milliers d'années après fermeture du stockage.

Enfin, les travaux de caractérisation du site de Meuse/Haute-Marne réalisés depuis plus d'une vingtaine d'années ont permis de déterminer le champ de contrainte *in situ* dans le Callovo-Oxfordien. Il s'agit d'un champ de contraintes anisotropes ; la contrainte verticale est bien estimée, elle correspond au poids des terrains.

Les études complémentaires relatives au comportement du Callovo-Oxfordien sous un chargement de gaz ont pour objectif de conforter les conclusions des évaluations de sûreté en après fermeture du dossier de demande d'autorisation de création. Elles se développent suivant plusieurs axes :

- la poursuite de l'acquisition de données sur le transfert de gaz dans les milieux argileux, plus particulièrement le Callovo-Oxfordien et les noyaux de scellements, au travers notamment d'essais de sollicitation au gaz de démonstrateurs de scellement à grande échelle dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ;
- la mise en œuvre de simulations numériques du transitoire hydraulique-gaz avec une représentation de complexité plus grande que celle prudente mise en œuvre pour le dossier de demande d'autorisation de création, plus particulièrement en termes de nombre de composants du stockage et de couplages explicites de processus (hydraulique-gaz, mécanique, thermique et chimie) ainsi que de représentation des interfaces (par exemple entre le noyau argileux des scellements et la roche) et des milieux (par exemple milieu fracturé pour la zone du Callovo-Oxfordien endommagée autour des ouvrages souterrains en champ proche). Ces simulations pourront s'appuyer sur des développements numériques visant à accroître la capacité de résolution numérique et la rapidité de calcul, permettant notamment la réalisation d'un plus grand nombre d'analyses de sensibilité ;
- la mise en œuvre de simulation numérique du champ de contraintes mécaniques naturelles *in situ* dans le Callovo-Oxfordien à l'échelle de la ZIOS et intégrant les données du champ de contraintes naturelles *in situ* du Callovo-Oxfordien issues de la campagne de forages profond ZBS ;
- l'étude de solutions techniques pour réduire la quantité d'acier (*i.e.* le terme source hydrogène) dans l'installation souterraine en après fermeture (cf. Chapitre 2.8.2 du présent document).

2.1.5.1.3 Les propriétés thermo-hydro-mécaniques (THM) et thermiques du Callovo-Oxfordien

Les actions correspondant aux propriétés thermo-hydro-mécaniques (THM) et thermiques du Callovo-Oxfordien ainsi qu'au modèle de comportement du Callovo-Oxfordien sous chargement thermique concernent la confortation des domaines de valeurs des caractéristiques retenues pour le dimensionnement thermique et THM du quartier pilote HA ainsi que celles retenues pour le quartier de stockage HA (cf. Encadré du chapitre 3.3.2.1 du présent document).

Concernant spécifiquement le comportement du Callovo-Oxfordien soumis à un chargement thermique et thermo-hydro-mécanique, en complément des données issues de la campagne de forages profonds à proximité de la ZIOS et du programme de reconnaissance à l'avancement, le modèle de comportement sera mis à jour suite aux résultats acquis par des essais menés dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

2.1.5.1.4 La surpression naturelle

L'existence d'une surpression naturelle dans le Callovo-Oxfordien a été analysée pour la conception et les analyses de sûreté dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création ; il a ainsi été retenu une approche prudente fondée sur une cause purement hydraulique de la surpression (ce qui intrinsèquement maximise les flux d'eau) et il a été montré que les conséquences, en particulier sur le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques, étaient limitées.

L'étude de la surpression naturelle et les conséquences induites sur son fonctionnement hydraulique en grand (cf. Encadré ci-dessous) se poursuit néanmoins afin d'améliorer la représentation des flux d'eau et de solutés et ainsi réduire les marges conservatoires prises en compte dans les évaluations de transfert par l'eau quant à la part hydraulique de la suppression.

LA SURPRESSION INTERSTITIELLE NATURELLE ET LE FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE EN GRAND DU CALLOVO-OXFORDIEN

Les différentes mesures de pression d'eau interstitielle réalisées dans le Callovo-Oxfordien depuis plus d'une quinzaine d'années au niveau du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne mettent en évidence une surpression d'eau interstitielle de l'ordre 0,5 MPa au maximum, soit environ 20 % de la charge hydraulique théorique définie par rapport aux charges hydrauliques mesurées dans les formations encaissantes du Dogger et de l'Oxfordien carbonaté.

Les causes potentiellement à l'origine de la suppression interstitielle observée dans le Callovo-Oxfordien ont été identifiées et sont de natures très différentes : des causes « physiques » (modifications récentes des conditions hydrauliques, réduction de la porosité, etc.), des causes liées aux phénomènes de transfert « non diagonaux » (osmose chimique et osmose thermique) et des causes chemio-hydro-mécaniques intrinsèques (plus particulièrement, les phénomènes de pression de disjonction). Il est fortement probable que cette surpression résulte de la combinaison de plusieurs phénomènes. L'examen de ces causes conduit, à ce jour, à privilégier les causes d'origines chemio-hydro-mécaniques intrinsèques sans pouvoir exclure la contribution d'autres types de cause, notamment les phénomènes hydrauliques.

La contribution de ces causes aux déplacements d'eau et de solutés dans le Callovo-Oxfordien dépend des phénomènes mis en jeu (convectif ou diffusif) et des propriétés de transfert à grande échelle. Toutefois, l'existence même de la surpression souligne globalement la faible capacité d'écoulement de l'eau du Callovo-Oxfordien et la faible migration des solutés. L'analyse des causes à l'origine de la suppression privilégie des phénomènes ne générant pas de déplacement d'eau par gradient de pression (pression de disjonction, osmose chimique, etc.), ce qui est en accord avec le transfert diffusif dominant des solutés à grande échelle dans le Callovo-Oxfordien. De fait, la surpression ne participerait pas, ou seulement de manière marginale, au transfert (convectif) des solutés à grande échelle dans le Callovo-Oxfordien.

Les incertitudes résiduelles concernent les contributions précises et effectives des différentes causes possibles à l'origine de la surpression et la distribution spatiale verticale et latérale de cette surpression à l'échelle de la zone de transposition, en particulier au niveau de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) où sera implantée l'installation souterraine.

Les études supports aux conséquences de la surpression naturelle permettront de conforter les données existantes sur les surpressions mesurées *in situ* au travers d'approches numériques et de nouveaux travaux expérimentaux sur certains termes de couplage en tant que possible. Les travaux envisagés dans la campagne ZBS fourniront également de nouvelles mesures de terrain des charges hydrauliques en pourtour de la ZIOS.

2.1.5.1.5 Le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques

Les études sur le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien (*e.g.* les propriétés de transfert/hydrodispersives (perméabilité, diffusion, surpression, etc.), leur comportement dans le Callovo-Oxfordien non perturbé, etc.) (cf. Encadré ci-dessous) concernent plus particulièrement le comportement du sélénium et sa solubilité en regard de l'approche prudente retenue pour le dossier d'autorisation de création.

LE TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES ET DES SUBSTANCES TOXIQUES CHIMIQUES DANS LE CALLOVO-OXFORDIEN

De nombreuses recherches ont été développées depuis plus d'une vingtaine d'années pour caractériser et représenter la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien. Ces études ont visé à apporter les connaissances nécessaires aux évaluations d'impacts radiologiques et toxiques après la fermeture définitive.

La diffusion est le processus dominant de transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien. Depuis plus d'une vingtaine années, le Callovo-Oxfordien a fait l'objet de très nombreuses mesures afin de conforter la prédominance du phénomène de diffusion à grande échelle et de caractériser ses paramètres , en particulier le coefficient de diffusion effectif et la porosité accessible, pour un ensemble de solutés.

Le socle de connaissances relatif au transfert des solutés dans le Callovo-Oxfordien est ainsi important, avec de nombreuses mesures expérimentales réalisées sur des échantillons collectés dans les différents forages profonds et au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et des modèles de diffusion et de rétention depuis les échelles du feuillet d'argile et de l'espace poral jusqu'à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien en grand. Les solutés étudiés, plus particulièrement l'eau tritiée (HTO), le chlore, l'iode, le sodium et le césium, permettent de couvrir un large spectre de comportement chimique des solutés dans le Callovo-Oxfordien.

L'étude des profils verticaux de concentrations en traceurs naturels (isotopes, gaz dissous, chlorure, etc.) dans le Callovo-Oxfordien confirme à grande échelle la prédominance du phénomène de diffusion pour le transfert des solutés dans le Callovo-Oxfordien.

Outre les propriétés de diffusion du Callovo-Oxfordien, la mobilité des éléments chimiques dans le Callovo-Oxfordien est gouvernée en second lieu par la forte réactivité/rétention des minéraux argileux pour de nombreux éléments chimiques.

La très grande majorité des radionucléides contenus dans les déchets radioactifs, par exemple les actinides comme l'uranium, présente une faible solubilité dans l'eau porale calci-sodique des argilites et une forte rétention sur les phases solides argileuses, principaux constituants minéraux des argilites, donc une très faible mobilité dans le Callovo-Oxfordien.

Seuls les radionucléides ayant une spéciation d'anion monovalent, tels que le chlore et l'iode, ont une faible réactivité vis-à-vis des phases solides : leur solubilité n'est pas contrôlée et leur sorption est nulle. La mobilité de ces anions monovalents est cependant très réduite dans le Callovo-Oxfordien par le phénomène d'exclusion des anions qui restreint l'accessibilité des anions à l'ensemble du réseau de pores.

En complément de la caractérisation des échantillons issus de la campagne ZBS vis-à-vis des propriétés de transfert des radionucléides, des actions sont prévues afin de réduire les quelques incertitudes résiduelles sur la migration du sélénium dans le Callovo-Oxfordien en lien avec sa spéciation et ses effets associés en termes de mobilité. S'il y a lieu, ces études pourront conduire à réaliser un essai au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

2.1.5.2 Une amélioration continue des connaissances des propriétés de la zone endommagée mécaniquement du Callovo-Oxfordien autour des ouvrages souterrains

Le creusement d'ouvrages souterrains implique une réorganisation du champ de contraintes qui, suivant la résistance de la roche, peut conduire à son endommagement autour des ouvrages. Dans le cas du Callovo-Oxfordien, cet endommagement se traduit par la formation d'une zone fracturée connectée et d'une zone avec une fracturation « discrète » (cf. Encadré ci-dessous).

LES ARGILITES DU CALLOVO-OXFORDIEN ENDOMMAGÉES MÉCANIQUEMENT ET LEURS PROPRIÉTÉS

L'endommagement (sa nature, son extension) est principalement lié au comportement mécanique du Callovo-Oxfordien, à la contrainte *in situ* (*i.e.* la profondeur des ouvrages) et à la méthode de soutènement (type de soutènement souple ou rigide, vitesse d'excavation, etc.).

La genèse de l'endommagement induit par le creusement ne dépend pas de la direction de creusement. En revanche, son expression et surtout l'extension de la zone où coexistent les différents types de fractures dépendent de l'orientation de l'ouvrage par rapport à la contrainte horizontale majeure (cf. Figure 2-4).

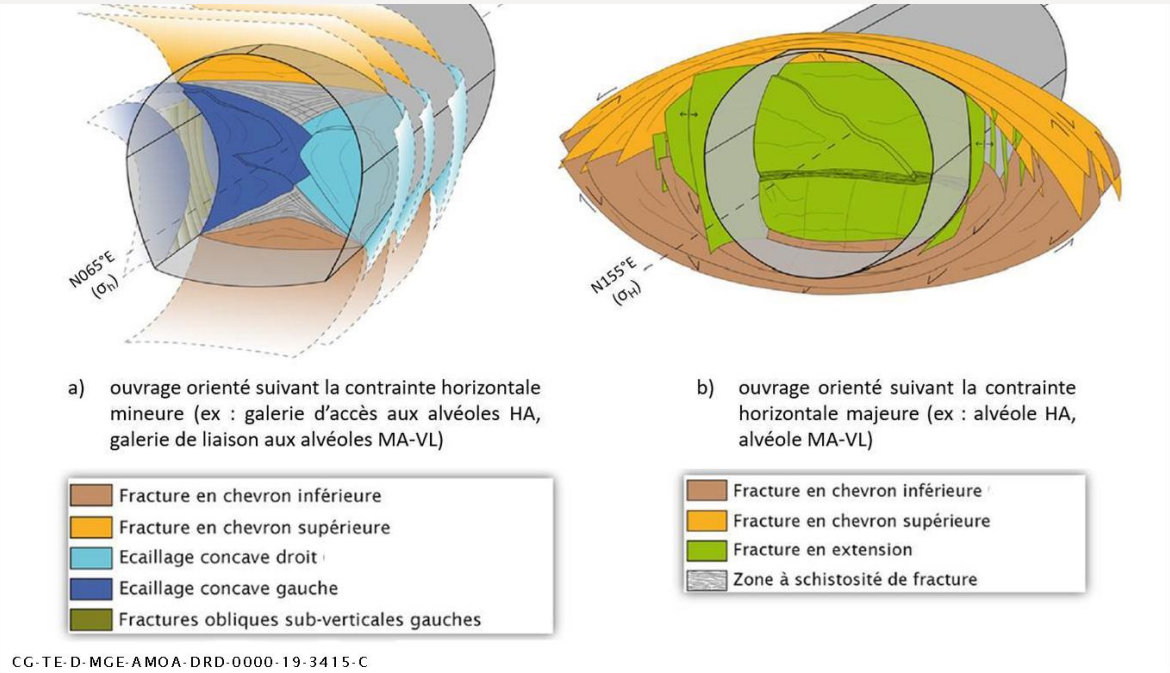


Figure 2-4 *Représentation schématique de la fracturation induite autour d'ouvrages souterrains localisés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien, suivant leur orientation : à gauche : galerie orientée suivant la contrainte horizontale mineure, à droite : galerie orientée suivant la contrainte horizontale majeure*

Les nombreuses caractérisations de l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien réalisées sur échantillons et au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne autour de différents ouvrages permettent de distinguer au sein de la zone perturbée mécaniquement par le creusement deux zones pouvant être conceptualisées de la manière suivante :

- une zone fracturée connectée (ZFC) comportant un réseau 3D de fractures connectées entre elles et à la paroi des ouvrages.

  Dans cette zone coexistent plusieurs familles de fractures : des fractures en cisaillement et des fractures en extension, ainsi que des fractures mixtes, principalement créées en cisaillement puis s'ouvrant ensuite sous l'effet de la convergence de l'ouvrage. L'ouverture géométrique locale de ces fractures varie beaucoup et peut atteindre plusieurs millimètres.

  Ce réseau dense induit une augmentation de la perméabilité de la roche de plus de deux ordres de grandeur immédiatement après le creusement de l'ouvrage due à la transmissivité des fractures et à la connectivité du réseau et non à la perméabilité intrinsèque de la roche ; son extension dépend de l'orientation de l'ouvrage par rapport aux contraintes *in situ* ;
- une zone avec une fracturation « discrète » (ZFD) située au-delà de la zone fracturée connectée.

  Cette zone est caractérisée par des fractures de cisaillement subparallèles à la paroi, de distribution peu dense et non ou très faiblement connectées entre elles, notamment longitudinalement et présentant des ouvertures infra-millimétriques.

Ces fractures sont associées à un endommagement diffus (microfissuration) dans les blocs qu'elles délimitent où à leur périphérie. La perméabilité de cette zone est initialement au plus de deux ordres de grandeur supérieure à celle du Callovo-Oxfordien sain. Au-delà de cette zone, le Callovo-Oxfordien n'est pas perturbé et retrouve sa perméabilité de son état sain. L'extension de cette zone est de l'ordre d'un diamètre de galerie.

Les blocs délimités par les fractures sont très peu ou non endommagés. Par ailleurs, cet endommagement faible et diffus concerne préférentiellement les blocs dans la zone fracturée connectée.

Ces deux zones présentent des propriétés hydraulique et mécanique spécifiques que les nombreuses études réalisées depuis 2005 ont permis de caractériser. La réalisation des essais *in situ* a permis d'acquérir des nombreuses données à plus grande échelle et de les confronter aux prédictions des modèles établis à plus petite échelle.

Des exercices (benchmark) d'inter-comparaison des modèles ont conduit à leur amélioration et à la définition des gammes de paramètres associés. Ces modèles ont permis de supporter l'utilisation de modèles plus simples dans le cadre de la conception et du dimensionnement des ouvrages souterrains portés dans le dossier de demande d'autorisation de création, en particulier avec l'utilisation des Eurocodes.

Suite aux nombreuses études de caractérisation menées sur le développement et la géométrie de ces zones endommagées mécaniquement et sur leurs propriétés, les incertitudes résiduelles sont limitées. Elles portent principalement sur la représentation explicite de la fracturation et dans une moindre mesure sur les effets d'un creusement réalisé au tunnelier pleine face ou de la vitesse d'avancement du creusement.

Concernant les méthodes de creusement, le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne a mis en œuvre un grand nombre de méthodes de creusement traditionnelles (foration-tir, BRH, MAP) et mécanisées (TAP, micro-tunnelier pour les alvéoles HA), sur des ouvrages de taille variée (du boulon de diamètre d'ordre centimétrique à la galerie d'environ 10 m de diamètre) permettant ainsi de caractériser leur effet sur l'endommagement du Callovo-Oxfordien. Seul le creusement au tunnelier « pleine face »[17], du fait des contraintes logistiques du Laboratoire de recherche souterrain (capacités en taille et en masse de la cage à matériel des puits non compatibles avec ce type d'équipements), n'a pas été mis en œuvre. Les observations montrent que les effets sont limités : on observe toujours le même schéma de zone endommagée précité. L'effet le plus important est lié au soutènement/revêtement (rigidité et distance de mise en œuvre par rapport au front). *A contrario*, l'effet de la méthode de creusement est limité.

[17] La différence entre un tunnelier « pleine face » et un tunnelier à attaque ponctuelle est l'outil d'attaque de la roche : une roue de coupe *vs* un outil à attaque ponctuelle.

Le croisement des observations et la compréhension du schéma de formation de la zone endommagée (ainsi que le retour d'expérience acquis dans d'autres roches argileuses et pour des domaines autres que celui du stockage géologique) conduisent à considérer que le tunnelier pleine face ne conduira pas à un schéma significativement différent de celui établi.

La réalisation des descenderies sera faite par un tunnelier « pleine face ». Ainsi, il s'agira, dans le cadre de la reconnaissance à l'avancement au cours de la réalisation des ouvrages de liaison, de préciser et conforter la maîtrise du développement de ces deux zones dans les ouvrages concernés. Il s'agira en particulier d'améliorer la caractérisation du développement géométrique initial du Callovo-Oxfordien en fonction des modalités de creusement des ouvrages (vitesse de réalisation, etc.).

Concernant les propriétés mécaniques du Callovo-Oxfordien endommagé mécaniquement au niveau de ses différentes unités litho-stratigraphiques (USC, UT et UA), des études complémentaires seront par ailleurs menées, notamment au Laboratoire de recherche souterrain pour conforter les marges de conception et de dimensionnement en termes de sensibilité à l'extension éventuelle de la durée de fonctionnement, d'optimisation technico-économique du revêtement/soutènement et de conception/dimensionnement des scellements. Ces études expérimentales seront menées en parallèle du développement de modèles de comportement plus complexes que ceux développés jusqu'à présent réalisé au travers de nombreuses actions (développement de représentation des milieux fracturés, benchmark, raffinement de modèles existant, etc.).

2.1.5.3 La surveillance dédiée au Callovo-Oxfordien

L'acquisition de connaissances sur les comportements du Callovo-Oxfordien sain et endommagé mécaniquement s'est accompagnée du développement de méthodes de caractérisation et de surveillance de ces comportements dans les conditions attendues dans l'installation souterraine.

Dans le cadre du développement progressif de l'installation et de la démarche d'amélioration continue suivie par l'Andra, les études sont ainsi maintenues concernant le développement des différents dispositifs de surveillance du comportement du Callovo-Oxfordien dans le temps, notamment autour des ouvrages souterrains et, plus particulièrement de la zone endommagée, afin de prendre en compte les développements scientifiques relatifs aux processus concernés (cf. Encadré ci-dessous).

LA SURVEILLANCE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET THM DU CALLOVO-OXFORDIEN

La caractérisation du comportement mécanique et THM du Callovo-Oxfordien a fait l'objet de nombreuses expériences menées dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, tant sur le Callovo-Oxfordien non endommagé que sur la zone de Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement autour des ouvrages souterrains et le suivi de son évolution dans le temps.

La caractérisation et le suivi de la zone endommagée reposent sur des observations de la fracturation en forage et des mesures de perméabilité (gaz ou eau) à partir de complétions multi-obturateurs dans un forage et entre forages.

Des mesures acoustiques ont également été réalisées pour caractériser la zone endommagée au droit de la galerie et suivre son évolution (cf. Expérimentation CDZ (Compression mécanique de l'EDZ)). Les capteurs placés dans des forages perpendiculaires à la galerie ont permis de cartographier les déformations du massif, les vitesses des ondes sismiques dans la roche et de dissocier la zone d'argilites saines de la zone endommagée mécaniquement et de faire le lien entre des mesures ponctuelles en forages (mesures de perméabilité entre packers ou observation de la fracturation).

La tomographie sismique en forages a également été testée avec des forages d'émission, des forages de réception, des sources piézoélectriques et des accéléromètres. Ces techniques géophysiques (tomographie) non intrusives, permettant d'accéder à une représentation de la zone endommagée mécaniquement à l'échelle de l'ouvrage.

Il s'agit en particulier d'actions concernant la surveillance du comportement mécanique et THM du Callovo-Oxfordien ainsi que la mise en œuvre de ces dispositifs dans l'installation souterraine de stockage Cigéo, plus particulièrement les méthodes et dispositifs non intrusifs, avec la poursuite du développement et la qualification des méthodes géophysiques de surveillance du comportement du Callovo-Oxfordien (zone perturbée mécaniquement, convergence, etc.).

Ainsi, les études sur des méthodes géophysiques, notamment acoustiques, seront poursuivies pour accéder à une meilleure représentativité de la zone endommagée au droit des ouvrages de liaison surface-fond et des alvéoles MA-VL et pour permettre un suivi précis de cette zone pendant l'exploitation de l'INB, en complément de mesures en forages, actuellement maîtrisées dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Des essais permettront de consolider et d'affiner les méthodes déjà testées dans le cadre de celles mises en œuvre pour les essais de démonstration des alvéoles de déchets HA par sismique transmission en adaptant les sources, les récepteurs, leur positionnement et la résolution des mesures à des ouvrages de grand diamètre et depuis le radier en galerie (sismique réfraction en paroi) en optimisant le nombre de capteurs, la résolution, en réduisant l'intrusivité du dispositif et en prenant en compte la présence de composants cimentaires.

2.2 Les colis de déchets radioactifs

2.2.1 Le socle de connaissances des colis de déchets radioactifs

Les colis de déchets radioactifs destinés à l'installation nucléaire Cigéo sont des éléments importants pour la protection au sens de l'arrêté du 7 février 2012 (15), ceci conformément à l'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 (17).

De ce fait :

- ils font l'objet de spécifications d'acceptation des colis définissant les critères que les colis de déchets radioactifs doivent respecter pour être acceptés dans l'installation nucléaire Cigéo. L'établissement des spécifications préliminaires d'acceptation des colis résulte de la mise en œuvre d'une démarche qui relie la conception, la sûreté et la connaissance des colis. Elles sont structurées en spécifications générales d'acceptation applicables aux colis primaires et en spécifications particulières d'acceptation dépendant du quartier de destination et du mode de stockage des colis primaires (18) ;
- ils font l'objet d'un processus de maîtrise de la qualité des colis qui a pour objectif de s'assurer que les colis de déchets stockés ou à stocker dans l'installation nucléaire Cigéo ne remettront pas en cause sa sûreté.

La connaissance des colis primaires est fournie par les producteurs. L'Andra analyse cette connaissance, l'intègre dans son socle de connaissances colis (cf. Encadré ci-dessous) et la prend en compte dans la conception et le fonctionnement de l'installation au regard des fonctions de sûreté à assurer dans les différentes situations de fonctionnement mais également au regard des risques et incertitudes en phase après fermeture.

Vis-à-vis en particulier du respect des fonctions de sûreté et conformément à la décision de conditionnement de l'Autorité de sûreté nucléaire et tel que mentionné à l'article L. 542-12 du code de l'environnement, l'Andra définit les spécifications d'acceptation des familles de colis auxquelles doivent se conformer les producteurs lors de la livraison de leur colis sur l'INB Cigéo afin de pouvoir y être acceptés en vue de leur stockage (cf. Chapitre 1.4.6 du présent document).

LE SOCLE DE CONNAISSANCES COLIS

Ce socle de connaissances colis regroupe ainsi l'ensemble des données établies par les producteurs sur les déchets et les colis de déchets, déjà produits ou à produire (*e.g.* les dossiers de connaissances, etc.) mais également des données Andra ou conjointes Andra/producteurs (*e.g.* les missions de surveillance menées par l'Andra, etc.). Il intègre en particulier l'inventaire de référence (8), c'est-à-dire l'ensemble des déchets et des colis à retenir pour les études de conception ainsi que les hypothèses structurantes sous-tendant son élaboration. Il présente également l'ordonnancement et les flux prévisionnels de livraison des colis (*e.g.* les chroniques).

Ce socle de connaissances intègre également les données sur l'origine des déchets, les procédés de conditionnement ou les hypothèses de conditionnement lorsque le conditionnement est à définir et les propriétés physico-chimiques des colis de déchets. Elles sont capitalisées au sein du socle de connaissances relatif aux colis de déchets qui permet, via sa base Oscar, de les organiser et de les mettre à disposition de l'ensemble des utilisateurs de connaissances de l'Andra, de garantir leur traçabilité ainsi que celle de leurs évolutions. Le socle de connaissances est également accessible aux producteurs.

Les nouvelles connaissances intégrées dans le socle de connaissances font l'objet d'un processus dédié de suivi des modifications des connaissances colis. Celui-ci a pour objectif d'analyser de façon systématique leur impact sur la conception et à terme l'exploitation de l'installation et sur la démonstration de sûreté du stockage et cela avant injection vers celles-ci. Ce processus est mis en œuvre dans la base Oscar et archivé dans cette dernière permettant ainsi de conserver chaque analyse d'impact menée. Le socle de connaissances capitalise également les connaissances recueillies par l'Andra dans le cadre du processus de surveillance des colis.

À ces connaissances précitées s'ajoute un socle de connaissances sur le comportement des colis dans le temps, en particulier dans les différentes conditions d'environnement en stockage, notamment en après fermeture, en incluant le relâchement des radionucléides et des substances chimiques toxiques. Ces connaissances ont été acquises depuis plus de 20 ans par les producteurs de déchets, par l'Andra et par les homologues étrangers de l'Andra, en particulier dans le cadre de projets de recherche Européens.

2.2.2 Les colis de déchets radioactifs du quartier pilote HA et de la tranche 1 du quartier de stockage MA-VL

2.2.2.1 La connaissance des colis : un processus d'amélioration continue

À ce stade, sous réserve d'autorisation par l'ASNR, de conformité des colis au processus d'acceptation dans le stockage et de confirmation des besoins industriels, les colis prévus dans le quartier pilote HA et les alvéoles MA-VL de la tranche 1 sont :

- des colis de déchets HA peu exothermiques en conteneur de stockage cylindrique et en acier non allié ;
- des colis de déchets MA-VL de type coque béton fibre (CBF-C'2) ;
- des colis de déchets MA-VL de type conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C) ;
- des colis de déchets MA-VL de type coques et embouts cimentés (CEC) et conteneurs amiante ciment (CAC).

Le conditionnement de ces colis est défini ainsi que leurs modalités de prise en charge dans l'installation nucléaire de stockage Cigéo (stockage direct ou en conteneur). Selon les colis, certains alvéoles peuvent contenir une seule famille de colis et d'autres plusieurs (co-stockage géométrique et/ou physico-chimique).

Les connaissances sur leur comportement dans les conditions de stockage (termes sources, etc.) sont bien maîtrisées suite aux nombreuses études menées sur plus de 20 ans de recherche. Ainsi, les actions relatives à ces colis relèvent de la démarche continue d'acquisition de connaissance permettant de maîtriser les marges de sûreté en réduisant les incertitudes/conservatismes identifiés.

2.2.2.2 Le comportement des déchets HA peu exothermiques

De nombreux travaux d'altération du verre ont été menés par l'Andra, ses homologues et les producteurs de déchets sur le comportement des déchets HA (cf. Chapitre 3.1.2.1 du présent document).

Des travaux plus spécifiques ont été réalisés sur les déchets vitrifiés HA peu exothermiques prévus dans le quartier pilote HA (*i.e.* colis de déchets dits « UMo », cf. Encadré ci-dessous) afin de préciser l'influence de la microstructure de la matrice verre sur son comportement à long terme.

Les actions prévues au regard du comportement des colis de déchets « UMo » dans les conditions de stockage dans les alvéoles du quartier pilote HA s'inscrivent dans la continuité de l'ensemble des acquis de connaissances réalisés et ont pour objet de conforter les marges retenues dans les évaluations de sûreté.

LES COLIS DE DÉCHETS UMO

Les verres « UMo » sont issus du retraitement de combustibles usés dits « UMo » (constitués d'alliage d'uranium et de molybdène). La matrice verre est de type vitrocristalline.

Ils sont constitués d'une phase vitreuse englobante majoritaire et de phases secondaires. L'altération de la matrice « UMo » de référence est contrôlée par l'altération de la phase vitreuse englobante dont la vitesse d'altération dépend de la composition du verre, du pH et de la température.

Ces études concernent en particulier le comportement de ces déchets dans différents fluides représentatifs du matériau de remplissage disposé entre l'extrados du chemisage et la roche selon différents états de son évolution chimique provenant de son interaction avec les eaux du Callovo-Oxfordien.

2.2.2.3 Le comportement des déchets des quatre premiers alvéoles MA-VL

De même que pour les déchets HA, les différents types de déchets MA-VL ont fait l'objet de nombreuses études de caractérisation quant à leur composition et leur comportement dans leurs conditions de stockage dans les alvéoles du quartier de stockage MA-VL.

Les comportements spécifiques de certains types de déchets MA-VL ont conduit à l'identification de catégories physico-chimiques de déchets MA-VL permettant de les classer (cf. Encadré ci-dessous). Les familles de colis de déchets MA-VL des quatre premiers alvéoles du quartier de stockage MA-VL appartiennent aux catégories 3, 4 et 5.

Les connaissances acquises montrent que les familles de déchets MA-VL4 et MA-VL5 ne présentent pas de réactivité particulière.

Les familles de déchets MA-VL3 présentent quant à elles un comportement spécifique lié au relâchement des produits de dégradation des déchets organiques qu'elles contiennent (cf. Encadré ci-dessous). Les actions prévues concernant ces types de déchets ont pour objet de préciser les marges retenues dans les évaluations de sûreté vis-à-vis des effets de ces composés organiques sur le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques (cf. Chapitre 2.7.4.3 du présent document). Elles portent en particulier sur la poursuite de la caractérisation des processus de dégradation de certains polymères (polychlorure de vinyle (PVC), cellulose, etc.) et la mise à jour de la base de données thermodynamiques de ces composés (ThermoChimie[18]).

[18] https://www.thermochimie-tdb.com/

LE CO-STOCKAGE PHYSICO-CHIMIQUE DES FAMILLES DE DÉCHETS MA-VL

Une grande majorité de déchets MA-VL, plus particulièrement au regard de leur dégradation chimique, ne présente pas d'interactions physico-chimiques particulières vis-à-vis du Callovo-Oxfordien, des radionucléides ou du béton.

Certains déchets MA-VL présentent intrinsèquement des interactions (*e.g.* perturbations) chimiques qui sont principalement (i) la perturbation organique due à la dégradation de composés organiques contenus dans certains de ces déchets MA-VL et susceptibles de générer des espèces complexantes des radionucléides et des substances toxiques chimiques et (ii) la perturbation saline due aux déchets MA-VL salins.

Afin de garantir la maîtrise de la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien, il est retenu de manière prudente à ce stade une séparation physique des colis de déchets MA-VL susceptibles de générer ces perturbations chimiques. Des dispositions restrictives en matière de co-stockage des déchets MA-VL ont ainsi été définies. Pour ce faire, les familles de colis ont été regroupées en sept catégories en considérant que l'ensemble des colis d'une même catégorie, quelle que soit leur famille d'appartenance, était co-stockable d'un point de vue physico chimique. Cette catégorisation permet l'identification des familles de déchets susceptibles d'être placées dans un même alvéole.

Les sept catégories retenues sont les suivantes :

- MA-VL1 : colis de déchets contenant une quantité significative de sels hors colis de boues bitumées ;
- MA-VL2 : colis de déchets bitumés ;
- MA-VL3 : colis contenant des déchets (ou autre constituant du colis hors matrice) composés de matières organiques ;
- MA-VL4 : colis de déchets non ou faiblement exothermiques cimentés ne contenant ni matière organique ni sels ;
- MA-VL5 : colis de déchets non ou faiblement exothermiques non cimentés[19] ne contenant ni matière organique[20] ni sels, notamment les déchets de structure issus du traitement des combustibles ;
- MA-VL6 : colis de déchets vitrifiés, non ou faiblement exothermiques, éventuellement après une phase préalable d'entreposage de décroissance qui permet de les déclasser de la catégorie HA0 ;
- MA-VL7 : colis de déchets sodés[21].

Des possibilités de co-stockage physico-chimique entre déchets MA-VL ont été retenues entre les familles de colis de déchets MA-VL4, les familles de déchets MA-VL5 et les familles de colis de déchets vitrifiés (MA-VL6).

[19] Les matrices à base de géopolymères entrent dans cette catégorie
[20] À l'exception des étiquettes sur étuis intermédiaires, colle ou peinture
[21] Le stockage du sodium métallique dans le centre de stockage Cigéo est interdit au stade actuel des spécifications préliminaires d'acceptation des colis de déchets. Toutefois, une demande particulière concernant la présence résiduelle des substances précitées, minimisée par le recours aux meilleures techniques disponibles, pourra être formulée par le producteur.

LE COMPORTEMENT DES DÉCHETS ORGANIQUES

Certains déchets MA-VL contiennent des composés organiques de natures diverses telles que cellulose, matières plastiques à base de PVC, ou résines échangeuses d'ions et bitumes. Ces composants organiques se dégradent progressivement dans le temps en situation de stockage, que ce soit par hydrolyse et/ou par radiolyse et ils relâchent en solution des molécules organiques. Certaines de ces molécules peuvent avoir des propriétés de complexation envers les radionucléides : des complexes organiques-radionucléides peuvent se former en solution, modifiant ainsi la spéciation du radionucléide, ce qui affecte sa solubilité et sa rétention par les matériaux en présence.

Il est attendu que les produits de dégradation hydrosolubles des composés organiques sont majoritairement des acides carboxyliques tels que l'acide iso-saccharinique (ISA, le principal produit de la dégradation de la cellulose), l'acide phtalique issu de la dégradation du PVC et d'autres molécules potentielles (acétate, adipate, gluconate, etc.). C'est pourquoi, la majorité des études menées à ce jour ont concerné les acides carboxyliques et en particulier l'ISA, qui présente un pouvoir complexant avéré. Le comportement des molécules organiques et leur effet sur le comportement des radionucléides ont été évalués pour le Callovo-Oxfordien.

L'effet intrinsèque des molécules organiques « complexantes » sur le comportement des radionucléides est double : une augmentation de leur solubilité et une diminution de leur rétention. Cet effet est propre à chaque molécule organique et à chaque radionucléide ; il se manifeste au-delà d'une concentration seuil de molécules organiques comme suit : la diminution du coefficient de distribution (Rd) et l'augmentation de la solubilité (Csat) sont de l'ordre d'un ordre de grandeur (Rd divisé par 10 et Csat multiplié par 10) par ordre de grandeur de la concentration en ligands organiques.

Le pouvoir complexant réel des molécules organiques pour un radionucléide donné dans un matériau donné doit prendre en compte les autres solutés, en particulier les cations majeurs, notamment parce que certains d'entre eux peuvent entrer en compétition avec le radionucléide.

Il a ainsi été possible de hiérarchiser (i) le pouvoir complexant des molécules organiques potentiellement issues de la dégradation des déchets et (ii) les familles de radionucléides relativement à leur sensibilité envers la complexation avec les molécules organiques. D'un point de vue général, la molécule au plus haut pouvoir complexant est l'ISA (acide isosaccharinique), l'acide phtalique étant moins complexant, et les actinides et lanthanides +III/+IV constituent les radionucléides les plus susceptibles de former des complexes organiques-radionucléides.

L'ensemble des évaluations numériques réalisées montre que l'effet de la perturbation organique est au plus de l'ordre de la dizaine de mètres dans le Callovo-Oxfordien et reste limité à quelques mètres en termes d'effet maximum.

2.2.3 Les conteneurs de stockage HA et MA-VL et les paniers de stockage MA-VL

Le seul mode de stockage pour les colis HA est le stockage en conteneur (cf. Encadré ci-dessous). Le stockage des colis primaires de déchets MA-VL est prévu quant à lui selon deux modes :

- le stockage direct de colis primaire directement en alvéole de stockage, qui concerne certaines familles de colis pour lesquelles le colis primaire satisfait aux fonctions attribuées à un colis de stockage avec un conteneur de stockage. Pour le stockage direct, deux sous-configurations sont possibles :
  - ✓ le stockage du colis primaire directement ;
  - ✓ le stockage du colis en panier de stockage.
- le stockage des colis primaires de déchets MA-VL après mise en conteneur de stockage dans l'installation nucléaire de surface. Deux sous-configurations sont possibles :
  - ✓ le stockage en conteneur standard, avec couvercle vissé ;
  - ✓ le stockage en conteneur renforcé vis-à-vis du confinement, c'est-à-dire avec un couvercle vissé et clavé[22].

HISTORIQUE DES CHOIX DE CONCEPTION DES CONTENEURS DE STOCKAGE HA ET MA-VL ET DES PANIERS DE STOCKAGE MA-VL

Les principales options de conception des conteneurs de stockage HA et MA-VL en termes de choix des matériaux constitutifs des conteneurs, de géométrie, de dimensions et de masse, et de modes de manutention ont été présentées dès le dossier 2005 Argile – Tome Architecture et gestion du stockage géologique (35).

Cela a permis de démarrer le développement industriel des conteneurs à la suite de l'instruction de ce dossier avec :

- sur une période de 2006 à 2011, la réalisation de campagnes de fabrication de prototypes de différents modèles et la réalisation d'essais de qualification ;
- depuis 2012, la démarche de conception et de qualification des modèles retenus pour l'installation nucléaire Cigéo avec les ajustements de dimensionnement et les essais de qualifications nécessaires pour permettre la prise en charge de l'ensemble des familles de déchets HA et MA-VL, en lien avec les développements menés sur les ouvrages de surface, les ouvrages souterrains et les moyens de manutention ;
- et depuis 2019, la réalisation d'un atelier démonstrateur du process de soudage des conteneurs de stockage HA permettant de valider le principe des opérations de fermeture du conteneur.

Le développement des paniers de stockage a débuté plus récemment, lorsque l'option du stockage direct de certaines familles de colis de déchets a été retenue. Le panier permet de manutentionner plusieurs colis primaires à la fois et de les gerber (*i.e.* les empiler).

Différentes actions sont prévues afin de conforter les connaissances sur le comportement des différents types de conteneur de stockage utilisés dans l'installation nucléaire Cigéo et leur faisabilité ainsi que celles sur les paniers des colis de déchets MA-VL. Du fait du rôle de ces composants dans le fonctionnement de l'installation, ces actions s'inscrivent dans la démarche générale de confortation des éléments des évaluations de sûreté et d'optimisation de la conception.

[22] Le clavage consiste en la solidarisation de deux parties d'un ouvrage construites indépendamment l'une de l'autre par ajout d'un liant.

2.2.3.1 Les conteneurs de stockage HA

Le développement du conteneur de stockage HA (cf. Encadré ci-dessous) a atteint un niveau pour lequel ses performances fondamentales supportant ses fonctions de service (tenue à la corrosion, tenue mécanique, aptitude au glissement dans l'alvéole, etc.) ont été vérifiées par simulation ou au travers d'essais, notamment sur des maquettes représentatives des conteneurs industriels envisagés ou sur des composants du conteneur (éprouvettes, pièces entières ou parties de couvercles, corps, zones soudées, patins, etc.) dans des conditions d'environnement représentatives du stockage.

Les conteneurs de stockage HA ont été dimensionnés afin de garantir le respect des fonctions de service et de sûreté qui leurs sont attribuées en phase de fonctionnement et en après-fermeture.

Ainsi, sur la base des conditions d'environnement et notamment des différents types de corrosion auxquels sera soumis le conteneur HA en conditions de stockage, le choix du matériau et des épaisseurs des différents composants permet de garantir :

- un niveau de performance mécanique, pour la manutention, la mise en place ou le retrait éventuel en alvéole ainsi que la tenue sous chargement mécanique, tant qu'une réduction d'épaisseur critique après corrosion n'est pas atteinte ;
- la tenue à la chute et aux chocs ;
- l'atténuation du rayonnement.

La capacité de fabrication du conteneur HA a été démontrée par la réalisation de prototypes répondant aux exigences mécaniques et métallurgiques, notamment selon les exigences issues de la normalisation pour des objets similaires. La conception et la fabrication des patins en céramique, ainsi que leur fixation sur la virole a également été réalisée.

Pour le soudage des composants constitutifs du conteneur de stockage, la technologie du soudage par faisceau d'électrons a été retenue afin de souder sur des épaisseurs importantes et d'obtenir des soudures de qualité métallurgique satisfaisantes, notamment vis-à-vis des phénomènes de corrosion et des contraintes résiduelles. Les premières fabrications de prototypes ont permis de qualifier le mode opératoire de soudage (QMOS) au stade du dossier d'autorisation de création.

Les qualifications des principes de modes opératoires de soudage du procédé de soudage des conteneurs de stockage ont été obtenues pour les assemblages du fond et du couvercle sur une virole d'épaisseur de 55 mm, valeur enveloppe des différents modèles de conteneur de stockage.

LES CONTENEURS DE STOCKAGE HA

De forme cylindrique, le conteneur de stockage HA est constitué d'une virole cylindrique en acier non allié. Un fond et un couvercle, d'une épaisseur adaptée à l'épaisseur de la virole, sont réalisés dans la même nuance d'acier forgé. Le conteneur HA est équipé de patins en céramique (cf. Figure 2-5).

Les conteneurs de stockage HA ont une longueur comprise entre 1 040 mm et 2 230 mm environ et un diamètre de l'ordre de 600 mm.

Six modèles de conteneurs de stockage HA sont ainsi conçus pour couvrir l'ensemble de l'inventaire des colis de déchets HA dont un modèle prévu pour les colis HA du quartier pilote HA.

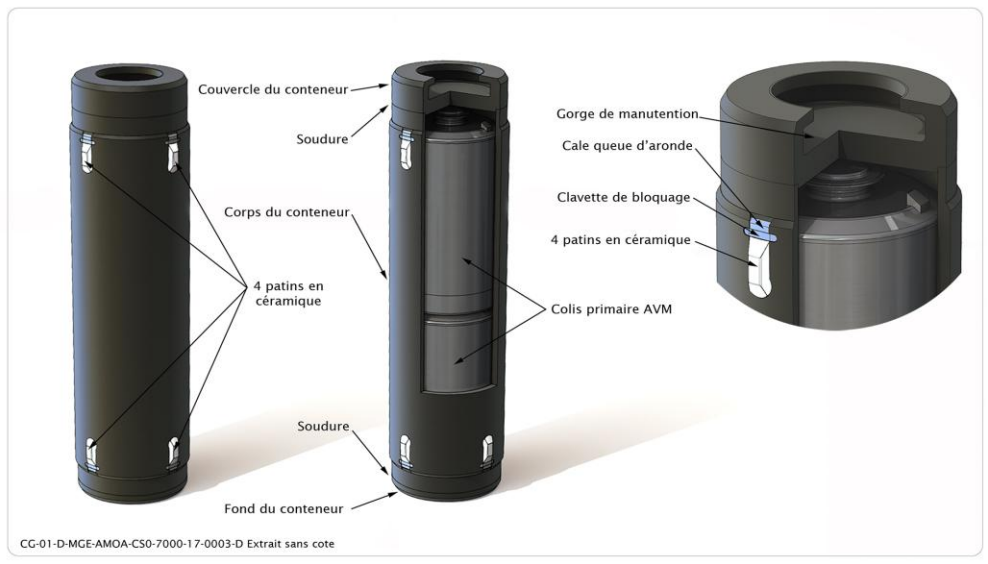


Figure 2-5 Schéma de principe d'un colis de stockage HA

Ces qualifications ont été obtenues dans des conditions de mise en œuvre qui ne sont pas complètement représentatives de celles dans l'installation nucléaire Cigéo. Ainsi les actions relatives au conteneur de stockage HA concernent la démonstration de la faisabilité technologique de l'assemblage soudé au faisceau d'électron dans des conditions industrielles représentatives de l'INB.

Pour s'approcher au mieux de celles-ci et acquérir des connaissances et compétences dans le procédé de fermeture des conteneurs de stockage HA, des travaux ont été lancés et se poursuivent sur la conception, la réalisation et l'exploitation d'un démonstrateur du process par soudage au faisceau d'électron. Ce démonstrateur intègre les étapes suivantes :

- opération de démagnétisation ;
- opération de nettoyage ;
- opération de soudage par faisceau d'électrons ;
- opération de traitement thermique par induction ;
- opération d'usinage du cordon de soudure ;
- opérations de contrôles non destructifs.

Pour chacune de ces opérations, les objectifs sont similaires, à savoir de démontrer la faisabilité du procédé complet de fermeture du conteneur de stockage et le fiabiliser dans des conditions représentatives du centre de stockage Cigéo, à l'exception de la présence des déchets radioactifs, donc plus particulièrement sans rayonnement. Sur les différentes opérations, les essais permettront de régler les différents équipements afin de s'assurer de la réalisation d'une soudure répondant aux exigences.

Dans le cadre des travaux réalisés au sein du démonstrateur de soudage, une étude visant à ajuster le cycle thermique de détensionnement sera également menée afin de conforter les marges de réalisation.

2.2.3.2 Les conteneurs de stockage MA-VL

La conception des conteneurs de stockage MA-VL (cf. Encadré ci-dessous) a atteint un niveau de développement pour lequel l'atteinte des fonctions en environnement représentatif des alvéoles de stockage MA-VL a pu être vérifiée au travers de simulations ou d'essais sur des prototypes représentatifs des conteneurs de stockage industriels envisagés.

La vérification de l'atteinte des performances dans les conditions attendues dans l'INB Cigéo a pu être atteinte par la réalisation des travaux suivants :

- validation des formulations de béton vis-à-vis des exigences de durabilité, de résistance mécanique et de propriétés de transfert ;
- quantification de l'impact des effets de l'environnement thermique, hygrométrique et irradiant sur l'évolution du béton des conteneurs ;
- quantification de l'impact des effets de l'environnement thermique, hygrométrique sur l'évolution de l'acier des conteneurs de stockage MA-VL en acier ;
- validation de la faisabilité en conditions industrielles des conteneurs en béton armé. Dans le cas des conteneurs en acier, les enjeux de fabrication sont différents. Il n'y a pas le même systématisme dans le process industriel ; ils seront réalisés et assemblés de manière plus ponctuelle ;
- démonstration du comportement mécanique des conteneurs (en béton et en acier) en environnement représentatif de l'alvéole de stockage : aptitude à la manutention et au gerbage, et capacité à évacuer les gaz ;
- démonstration de la pérennité de la fonction de manutention en situation incidentelle/accidentelle (séisme, chute ou incendie).

Le développement et la qualification des conteneurs de stockage MA-VL sont ainsi très avancés.

LES CONTENEURS DE STOCKAGE MA-VL

Le conteneur de stockage est de forme parallélépipédique. Il est constitué d'un corps et d'un couvercle vissé. Il présente des réservations ajustées à la géométrie des colis primaires et à celle des moyens de manutention associés.

Deux grandes typologies de conteneurs sont retenues, associées à des modèles de conteneur de stockage selon les familles de colis qu'ils contiennent :

- des conteneurs préfabriqués en béton armé avec cinq modèles de colis de stockage : CS1 à CS5 (cf. Figure 2-6) ;
- des conteneurs en acier avec deux modèles de colis de stockage : CS6 et CS7.

Ces sept familles de conteneur de stockage se déclinent en 14 modèles en fonction de leur aménagement interne, permettant de gérer l'intégralité des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence.

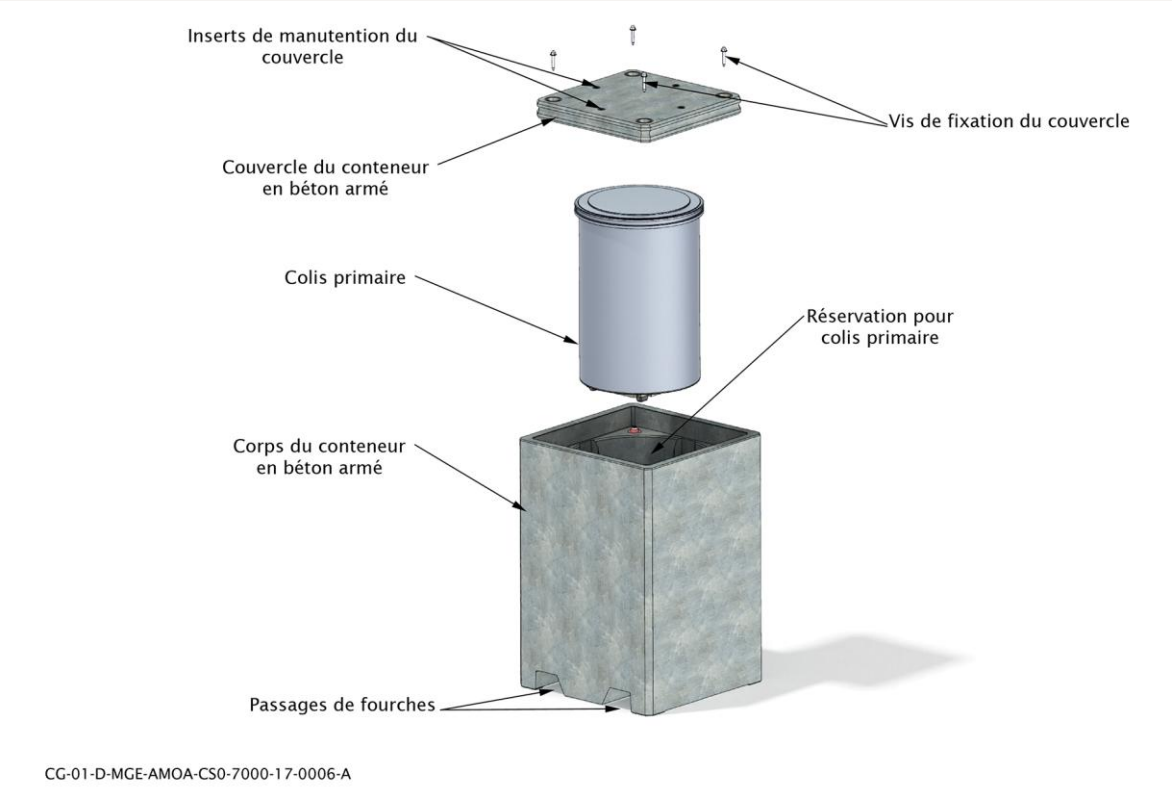


Figure 2-6 *Schéma de principe d'un conteneur de stockage MA-VL : exemple du CS3*

Il reste principalement à mener une action de vérification du facteur de remise en suspension d'aérosol en situation accidentelle de chute (*e.g.* conditions dynamiques) retenu dans le dossier de demande d'autorisation de création pour les colis de déchets afférents à ce risque.

Une campagne d'essai sera menée selon un protocole d'essais dédié au cours des prochaines années afin de vérifier de manière plus détaillée ce facteur de remise en suspension d'aérosols pour les différentes géométries de conteneur de stockage MA-VL concernées. Dans le cas de l'utilisation d'un conteneur renforcé vis-à-vis du confinement, l'impact de la présence du liant de clavage sera également testé.

Des essais seront également réalisés en conditions statiques, afin de vérifier le facteur de remise en suspension des conteneurs de stockage en condition normale de stockage en alvéole. L'objectif sera de vérifier que la ventilation dans l'alvéole ne peut pas entraîner une remise en suspension et la sortie de particules. L'impact d'un effet de convection lié à un gradient de température, dans le cas de déchets exothermiques, sera également analysé.

Des modifications de formulations des bétons de conteneurs de stockage pourraient être nécessaires pour s'adapter aux évolutions de la réglementation en matière de béton bas carbone et/ou bien des filières d'approvisionnement en matières premières (cendres volantes, laitiers, etc.). Dans ce cas, les nouvelles formulations seront qualifiées selon les mêmes protocoles que les formulations portées dans la demande d'autorisation de création.

Par ailleurs, des travaux seront menés en termes d'industrialisation du process de fabrication des conteneurs de stockage MA-VL, notamment quant à la minimisation du risque d'endommagement lors de l'étape de dénoyautage et sur les outils de contrôle non destructif (par exemple présence et géométrie de défauts de type fissures, bulles, éclats, etc.).

2.2.3.3 Les paniers de stockage MA-VL

Le stockage direct de certains colis de déchets MA-VL nécessite la mise en œuvre d'un panier (cf. Encadré ci-dessous) afin de permettre la manutention de plusieurs colis en même temps ce qui optimise les flux, ainsi que le gerbage.

LES PANIERS DE STOCKAGE DE DECHETS MA-VL

Certaines familles de colis seront mises en stockage directement sans mise en conteneur de stockage à l'aide d'un panier. Ces paniers permettent le transfert de plusieurs colis primaires depuis la surface et leur manutention en alvéole de façon simultanée afin d'optimiser les flux en phase de fonctionnement et, s'il y a lieu, leur empilement dans la partie utile de l'alvéole. Ils ne doivent pas, par ailleurs, remettre en question les propriétés et les fonctions des colis primaires concernés.

Le développement des paniers a suivi plusieurs étapes. Les travaux menés dans le cadre de l'avant-projet ont permis un premier dimensionnement de deux modèles retenus pour la prise en charge (i) des colis primaires de type conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C) et (ii) des conteneurs en béton de 500 litres contenant des fûts de boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique (500 L FI) (cf. Figure 2-7 et Figure 2-8).

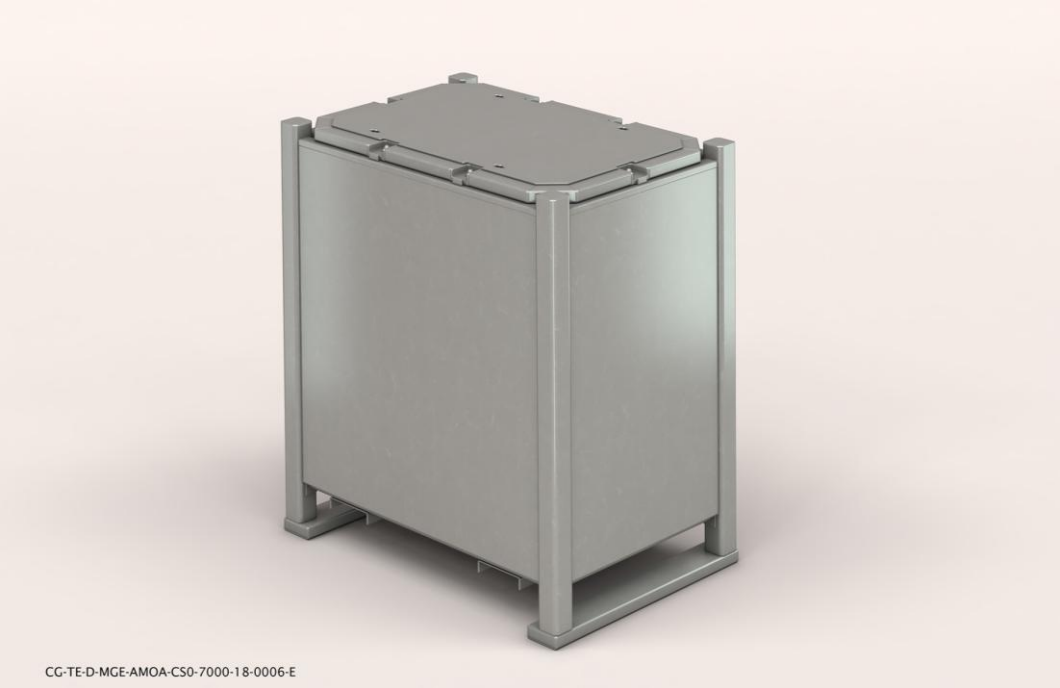


Figure 2-7 *Schéma de principe d'un panier de stockage de colis de déchets MA-VL CSD-C*

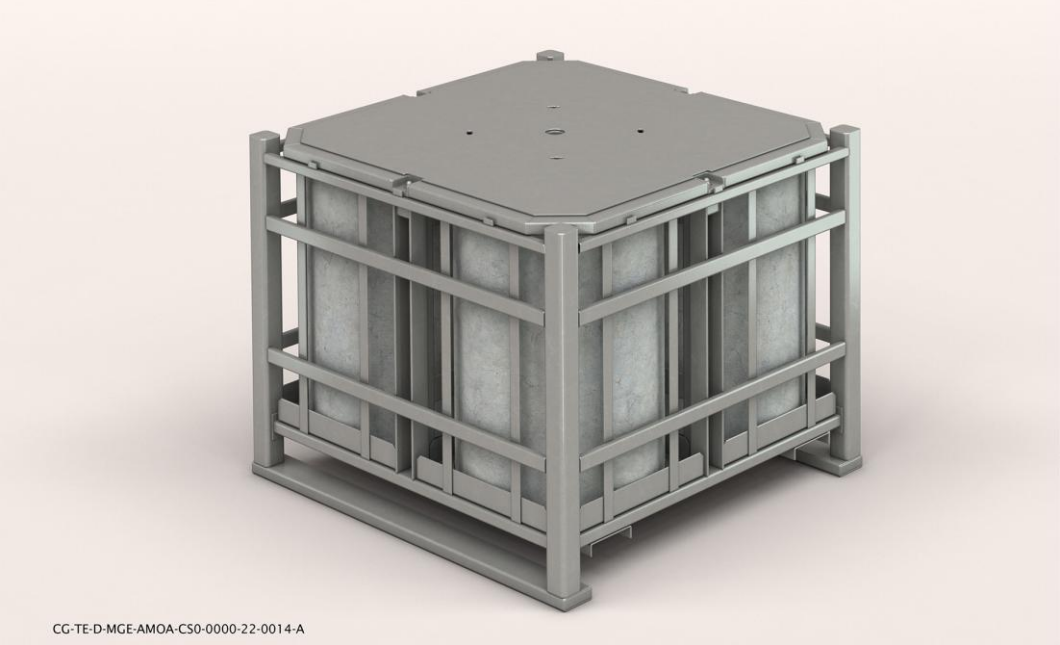


Figure 2-8 *Schéma de principe d'un panier de stockage de colis de déchets MA-VL 500 L FI*

Suite à ce premier dimensionnement qui a permis de valider la faisabilité d'utilisation des paniers, des travaux seront poursuivis pour optimiser leur design avec un double objectif de réduction de la masse d'acier dans le stockage et de coût (cf. Figure 2-9 et Figure 2-10).

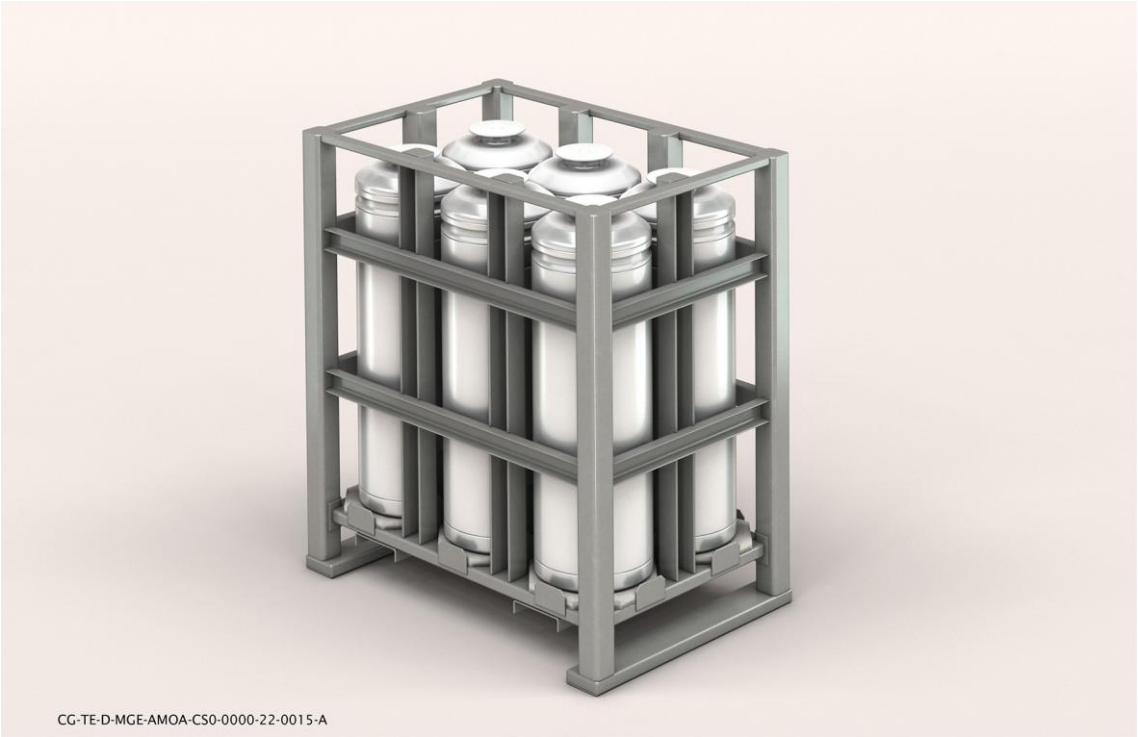


Figure 2-9 *Schéma illustratif d'un concept de panier de stockage optimisé de colis de déchets MA-VL CSD-C*

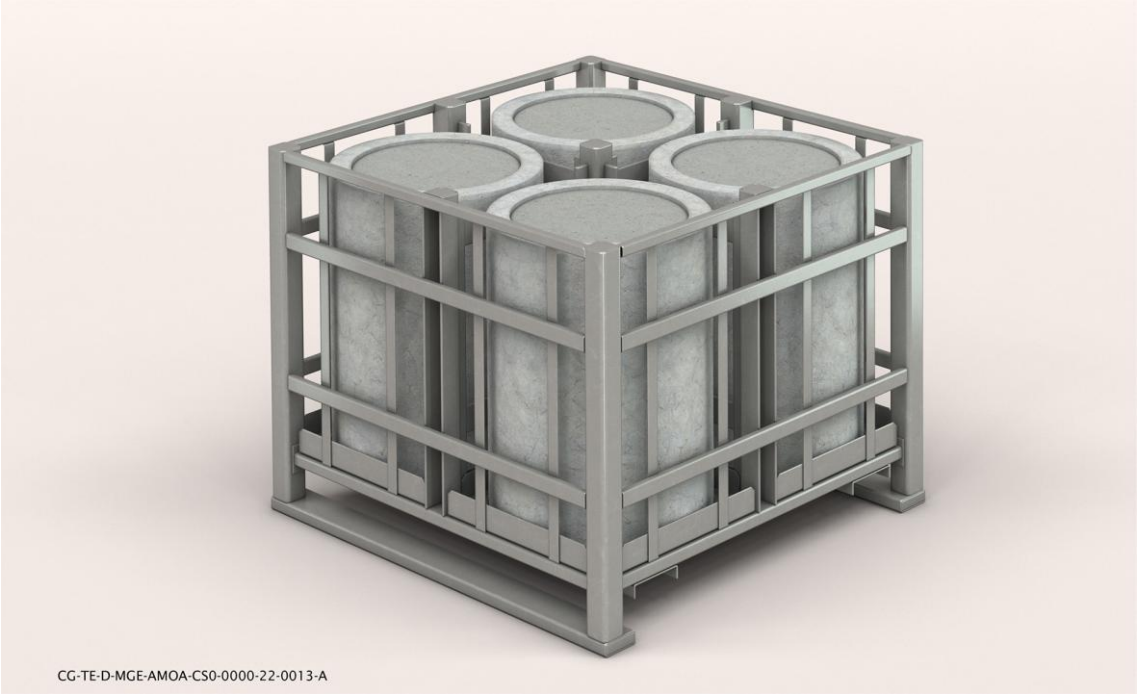


Figure 2-10 Schéma de principe d'un panier de stockage optimisé de colis de déchets MA-VL 500 L FI

Suite aux travaux de dimensionnement de ces paniers de stockage, des prototypes échelle 1 seront fabriqués en conditions industrielles et des essais de qualification seront réalisés, notamment des essais de tenue à la chute, afin de valider le respect des fonctions qui leurs sont attribuées.

2.3 Les installations de surface

2.3.1 Une conception anticipée

S'agissant d'une installation prévue pour une durée de fonctionnement dépassant le siècle et faisant l'objet d'un développement progressif, il n'est pas possible d'établir pour toutes ses parties, une demande d'autorisation de création homogène du point de vue de leur définition technique pour la totalité de ses composants.

Le mode de développement progressif de l'installation nucléaire Cigéo conditionne donc le niveau de détail (esquisse, avant-projet/options de sûreté, etc.) à apporter dans les différentes pièces du dossier d'autorisation de création.

Les installations de surface seront parmi les premiers ouvrages réalisés. Ainsi, dans le cadre du déroulement du projet, de nombreuses études menées lors des phases d'avant-projet sommaire et d'avant-projet détaillé ont permis d'aboutir à la configuration présentée dans le dossier de demande d'autorisation de création.

La réalisation de ces installations s'appuie sur l'ensemble des connaissances acquises lors de la réalisation des installations nucléaires de base « classiques » (cf. Encadré ci-dessous). En effet, la conception des installations de surface relève essentiellement d'une déclinaison à l'INB Cigéo de celle issue du retour d'expérience du fonctionnement d'autres installations nucléaires de base.

LES INSTALLATIONS DE SURFACE DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE CIGÉO

Les bâtiments de surface se répartissent sur les deux zones de l'installation nucléaire de base Cigéo : la zone descenderie et la zone puits.

Les installations de surface de la zone descenderie comprennent les activités nucléaires pour la réception et la préparation des colis en vue de leur stockage en couche géologique profonde ainsi que les bâtiments supports à ces deux activités principales (cf. Figure 2-11).

La zone de l'installation nucléaire de la descenderie regroupe notamment le bâtiment nucléaire de surface dénommé « Exploitation phase 1 » (EP1), les têtes de decenderies service et colis, les moyens de soutien au fonctionnement de l'installation nucléaire de base (bâtiment dédié aux fonctions sûreté/sécurité/environnement, ouvrages du réseau de lutte contre l'incendie, centrale de secours, ouvrages de gestion des eaux et de traitement des effluents liquides conventionnels, ateliers de maintenance, etc.) ainsi que le terminal ferroviaire nucléaire.

Les installations de surface de la zone puits comprennent les ouvrages et bâtiments liés à l'exploitation nucléaire de l'installation souterraine, aux travaux de construction et d'extension des ouvrages souterrains ainsi qu'à leurs activités supports (cf. Figure 2-12).

Les ouvrages et équipements liés au soutien et à la maintenance de la partie de l'installation souterraine en exploitation nucléaire sont implantés au sud de la zone puits. Outre les ouvrages nécessaires aux moyens de manutention et de transfert par un puits dédié, la zone exploitation contient les ouvrages dédiés à l'accueil et au transfert du personnel d'exploitation vers l'installation souterraine (zone en exploitation), les ouvrages de ventilation dédiés respectivement à l'apport d'air frais et à l'extraction d'air vicié, ainsi que les moyens de soutien au fonctionnement de l'installation nucléaire (bâtiment de lutte incendie et de secours aux victimes, ouvrages du réseau de lutte contre l'incendie, centrale de secours, ouvrages de gestion des eaux et de traitement des effluents liquides conventionnels, ateliers de maintenance, etc.).

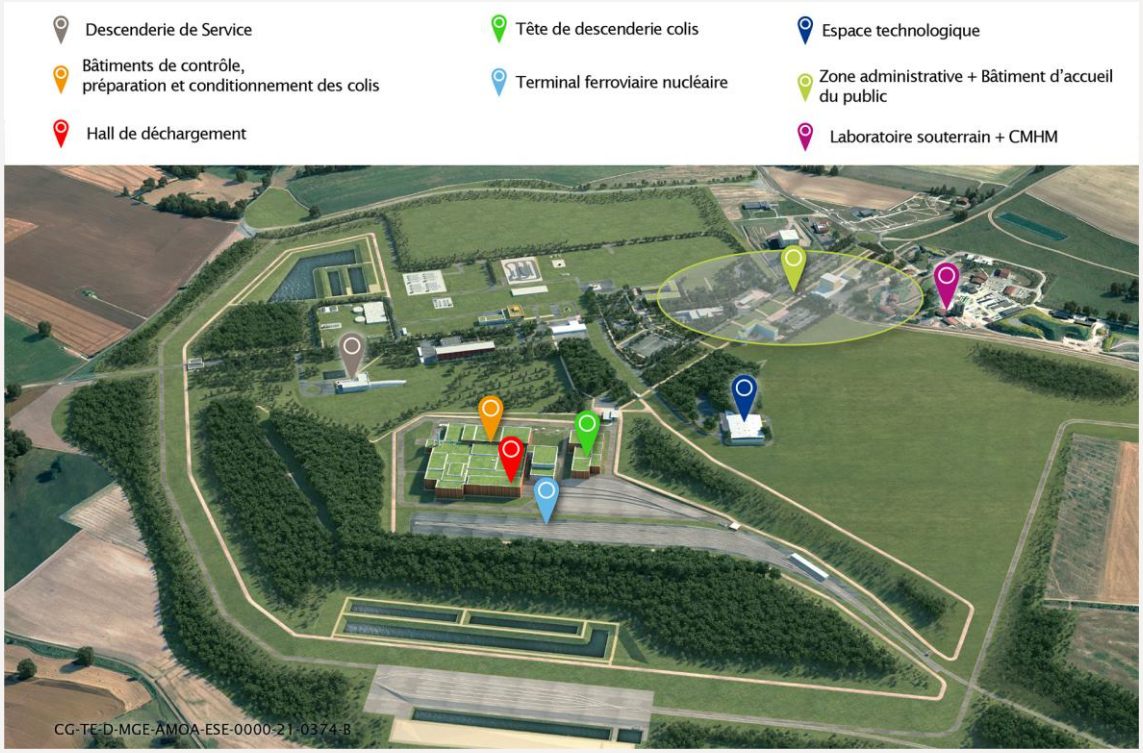


Figure 2-11 *Vue illustrative des ouvrages de la zone descenderie construits pendant la phase de construction initiale (espace technologique et Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne préexistants représentés à titre indicatif)*

Figure 2-12 Vue illustrative des ouvrages de la zone puits construits pendant la phase de construction initiale

Les ouvrages et équipements liés aux travaux d'extension des ouvrages souterrains dans le cadre des tranches ultérieures à la tranche 1 sont implantés au centre et au nord de la zone puits. Il s'agit notamment des ouvrages associés aux puits reliant la surface « travaux » à la zone de soutien logistique travaux de l'installation souterraine pour le transfert du personnel « travaux », à l'apport d'air frais et à l'extraction d'air vicié, ainsi qu'à l'apport et l'évacuation de matériel et de matériaux de construction.

Le traitement et le stockage des verses sont également situés dans cette zone, au nord de la zone puits relevant aussi du périmètre de l'installation nucléaire Cigéo.

La majorité des actions prévues ont pour objet d'apporter quelques éléments de confortation de ceux déjà acquis au regard du dimensionnement de l'installation et de son fonctionnement. Des actions d'identification et d'analyse d'optimisations de la configuration des installations de surface retenue pour le dossier de demande d'autorisation de création seront également menées. Ces actions s'inscrivent dans la démarche globale d'amélioration continue de la conception des ouvrages au regard des spécificités de l'INB Cigéo.

Les études envisagées sur les installations de surface ont ainsi pour objet d'apporter des éléments complémentaires permettant de conforter :

- la préparation de la construction des installations (cf. Chapitre 2.3.2.1 du présent document) ;
- l'affinement de la conception de la cellule de réalisation des contrôles hors flux si ceux-ci étaient amenés à être réalisés sur l'INB Cigéo (cf. Chapitre 2.3.2.2 du présent document) ;
- la confortation du dimensionnement et du comportement des verses (cf. Chapitre 2.3.3 du présent document).

2.3.2 Les bâtiments de surface de l'installation nucléaire

2.3.2.1 La « reconnaissance géotechnique »

Comme tout bâtiment, la réalisation des bâtiments de surface nécessite une reconnaissance *in situ* afin de préparer la réalisation des fondations.

Les nombreux acquis sur la caractérisation de la formation géologique affleurant en zone descenderie permettent d'avoir, pour les bâtiments/ouvrages de cette zone, des études géotechniques adaptées à la phase de conception d'avant-projet. En ce qui concerne la zone puits, une campagne d'étude géophysique par sismique réfraction a été menée (cf. Encadré ci-dessous).

LES CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DES ENCAISSANTS SUPÉRIEURS

En 2015 et 2016, ont été réalisées des campagnes d'investigations géotechniques de conception en phase d'avant-projet avec pour objectif de définir les caractéristiques géotechniques des encaissants supérieurs de la zone descenderie.

Ces résultats ont servi de données d'entrée pour établir les hypothèses géotechniques à prendre en compte à ce stade de développement du projet de centre de stockage Cigéo et les principes de construction des ouvrages (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et des voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants).

En complément et dans le cadre du contexte géologique du centre de stockage Cigéo, des campagnes de sismique réfraction ont été menées en 2015 et 2016 en zone descenderie et en zone puits permettant de mieux définir les couches géologiques jusqu'à 80 mètres de profondeur (Calcaires du Barrois et Marnes du Kimméridgien) et faire apparaître des signes de fracturation et de karstification dans les Calcaires du Barrois.

La zone descenderie et la zone puits sont positionnées en tête de bassin. À cet endroit, les faibles épaisseurs des Calcaires du Barrois ainsi que le caractère diffus des infiltrations limitées en volume à la partie efficace des précipitations de surface et sans apports hydriques amonts ne sont pas favorables au développement d'un réseau karstique organisé (concentration des écoulements dans des conduits de grande dimension) avec des cavités de grandes dimensions. Vu les contextes géologiques et hydrogéologiques, aucune cavité de grande taille (cavité visitable à grand développement vertical et/ou horizontal) n'est attendue sur ces zones mais plutôt des cavités d'épaisseur pluri décimétrique.

Pour la zone descenderie, des investigations complémentaires à un maillage plus fin seront menées au droit de certains ouvrages afin de conforter les hypothèses retenues pour la conception des ouvrages sur cette zone.

Pour les ouvrages concernant la zone puits, les études de conception réalisées à ce stade ont été effectuées en prenant des dispositions constructives conservatrices. Ainsi, afin de préciser les marges retenues à la suite de ces études, une campagne d'investigation géotechnique est prévue en deux étapes. Une première campagne avant le défrichement/déboisement du Bois Lejuc sera menée en localisant les sondages sur les chemins blancs d'entretien forestier. Après le défrichement/déboisement, les sondages seront localisés au droit des ouvrages et des aménagements à réaliser comme pour la zone descenderie.

2.3.2.2 Les contrôles hors flux

Les contrôles hors flux permettent de s'assurer le cas échéant de l'efficacité des dispositions de maîtrise de la qualité des colis réalisées préalablement à ces contrôles hors flux.

Cette efficacité est démontrée si ces contrôles hors flux mettent en évidence :

- aucun écart non détecté par une action de surveillance amont (producteur/Andra) ;
- aucun écart susceptible de conduire à suspendre l'approbation.

Les contrôles hors flux pourront être réalisés s'il y a lieu sur le site de conditionnement des déchets, sur le site d'entreposage, sur le site de stockage ou sur tout autre lieu que l'Andra désignera.

À ce stade, la localisation qui sera *in fine* retenue par type de contrôle n'est pas arrêtée. En effet, un travail avec les producteurs est en cours afin de définir au juste besoin les contrôles hors flux nécessaires au regard des spécifications d'acceptation et des caractéristiques des colis.

Ainsi, et en lien avec la maîtrise de la qualité colis de l'Andra (cf. Chapitre 1.4.6 du présent document), l'analyse du besoin, fonction de la connaissance des colis, du processus d'approbation puis d'acceptation, des résultats des actions de surveillance menées par l'Andra et de l'état de l'art des techniques disponibles, pourrait conduire à maintenir l'ensemble des contrôles hors flux ou à s'affranchir de certains d'entre eux ou à mettre en place une surveillance renforcée.

Dans le cadre de la configuration retenue pour le dossier de demande d'autorisation de création, il a été fait le choix de façon conservatoire de prévoir la localisation des différents contrôles hors flux identifiés dans le bâtiment nucléaire de surface EP1 (cf. Encadré ci-dessous).

Ces différents contrôles hors flux qu'il est envisagé de réaliser ne nécessitent pas d'actions spécifiques car la quasi-totalité de ces contrôles sont déjà mis en œuvre sur différentes installations nucléaires de base. Il s'agira de les adapter à l'installation nucléaire Cigéo (mesures de débit de dose, etc.), à l'exception des contrôles concernant la puissance thermique des colis et la corrosion qui sont prévus dans la cellule de mesures « puissance thermique et corrosion ».

En effet, les principes de conception et d'agencement industriel de la cellule de mesures « puissance thermique et corrosion » sont identiques aux autres cellules du process de contrôle (accès, postes de télémanipulation, pont de manutention nucléarisé, etc.). Néanmoins les équipements de contrôle dont la cellule sera équipée sont en cours de développement et seront implantés et intégrés ultérieurement à de l'ensemble. Ces développements concernent en particulier l'adaptation de dispositifs de contrôle déjà existants, par exemple un calorimètre, à la puissance thermique des colis de déchets vitrifiés HA (valeur et décroissance), en visant la simplicité, la rapidité et le juste besoin de précision.

» LES CONTROLES HORS FLUX DANS L'EP1

En l'état actuel de la conception, un certain nombre de contrôles hors flux sont identifiés comme pouvant être réalisés le cas échéant dans le bâtiment nucléaire de surface EP1 :

- l'identification et la quantification de l'activité des radionucléides mesurables des colis primaires HA et MA-VL dans la cellule de spectrométrie gamma ;
- la mesure du dégagement d'hydrogène dans une cellule de dégazage (cf. Figure 2-13) ;
- l'imagerie des éléments constitutifs des colis primaires MA-VL et de leurs cartographies en densité dans la cellule d'imagerie aux rayons X ;
- la mesure de la contamination, des débits de dose et de l'intégrité dans la cellule de contrôle C5 hors flux ;
- la mesure de la puissance thermique dégagée par les colis primaires HA et MA-VL et la mesure de la corrosion interne des colis primaires dans la cellule « puissance thermique et corrosion ».

Le bâtiment est conçu pour permettre leur réalisation le cas échéant.

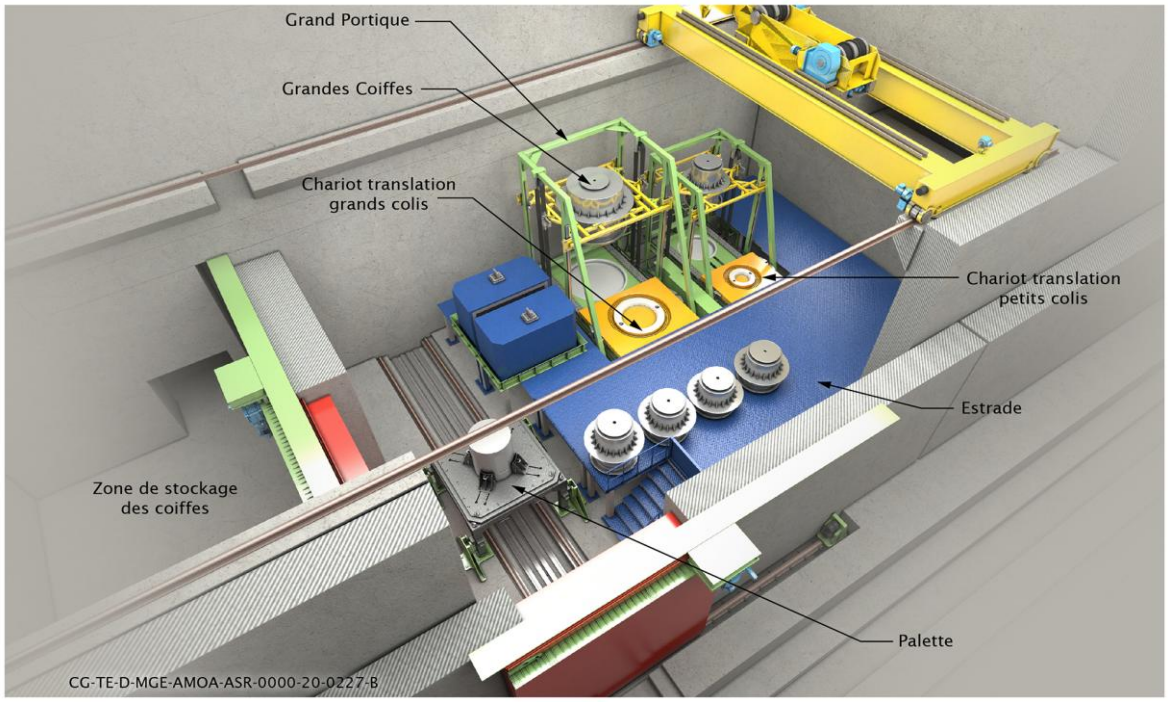


Figure 2-13 *Illustration d'un exemple d'implantation de la cellule de contrôle de dégazage dans le bâtiment de surface nucléaire*

2.3.3 Les verses

En l'état actuel de leur conception, les verses sont constituées de talus d'environ une vingtaine de mètres de haut qui seront végétalisés (cf. Encadré ci-dessous).

Au travers des premières expérimentations menées sur les argilites du Callovo-Oxfordien excavées dans le cadre de leur mise en verses sur le centre de Meuse-Haute-Marne, l'Andra a défini des spécifications techniques permettant de procéder aux études de conception d'avant-projet. Ces spécifications concernent notamment les caractéristiques géotechniques du matériau (classement GTR selon la norme NF P11-300 de 1992 (36)), les coefficients de foisonnement (de transport et résiduels), les hauteurs et pentes admissibles de mise en verses, les plages d'utilisation du matériau, le compactage et la traficabilité[23], etc.

LES VERSES

Les verses sont les matériaux issus du creusement des descenderies, des puits, des galeries de liaison et de la zone de stockage souterraine dans le Callovo-Oxfordien. Leur volume global représente à terminaison environ 11 millions de m³. Ces verses sont placées sur la zone travaux au niveau de la zone puits (cf. Figure 2-14).

Concernant le Callovo-Oxfordien, une partie des argilites excavées sera réutilisée lors de la fermeture de l'installation. On distingue ainsi :

- les verses dites « vives » qui serviront 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.

[23] La traficabilité est la capacité de la plateforme à faire l'objet d'un trafic de véhicules ou de personnes. Elle dépend de la portance du sol.

Figure 2-14 Illustration de la zone puits et de la zone travaux comprenant les verses

L'Andra prévoit de valoriser les verses « mortes » dans des filières extérieures à l'INB permettant d'en réduire ainsi leur emprise de stockage.

La mise en dépôt des verses se fait à partir d'une assise compactée faiblement perméable. La réalisation des verses se fait ensuite par ajouts successifs de couches d'argilites qui seront compactées et contrôlées. Au-dessus de ce remblai d'argilites, une couverture végétalisée est installée au fur et à mesure afin de protéger les argilites excavées des intempéries et de limiter l'infiltration des eaux au travers des verses. Pour cela, sont mis en place :

- un niveau drainant afin de faciliter la reprise de la végétation ;
- du matériau terreux composé par les matériaux récupérés du décapage de la zone puits amendé par les souches broyées des arbres du Bois Lejuc ;
- de la végétalisation afin de favoriser l'évapotranspiration.

Du fait des principes constructifs retenus et du contrôle qualité associé, la percolation des eaux dans les verses sera très faible.

Les verses présentent quelques spécificités nécessitant la réalisation avant la phase de construction initiale d'études support à la confortation de leur éventuel impact sur l'environnement par leurs eaux de ruissellement (cf. Chapitre 2.3.3.1 du présent document) et vis-à-vis de leur tenue mécanique sur la durée d'exploitation de l'installation nucléaire Cigéo (cf. Chapitre 2.3.3.2 du présent document).

2.3.3.1 La gestion des effluents issus des verses

Du fait des spécificités minéralogiques des argilites du Callovo-Oxfordien, les eaux de ruissellement des verses vont posséder une composition chimique particulière (cf. Encadré ci-dessous). Ces eaux de ruissellement sont collectées au niveau d'un bassin et retraitées.

Les objectifs de traitement des eaux de ruissellement des verses visent à obtenir une qualité d'eaux rejetées compatible avec la composition chimique des eaux superficielles. Il est à noter qu'en complément des paramètres physico-chimiques énoncés par la directive cadre sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000 (37), comprenant l'arsenic, vingt éléments complémentaires dont l'uranium sont analysés dans cette filière de traitement.

LES EFFLUENTS ISSUS DES VERSES

La chimie des eaux au sein des argilites (eaux porales naturelles, eaux de percolation, etc.) dépend principalement de la nature et de la teneur en minéraux argileux et non argileux, des processus d'oxydo-réduction (notamment en présence ou non d'oxygène) et des processus de sorption qui peuvent piéger des éléments chimiques en surface de certains minéraux.

Différentes études réalisées à partir d'argilites excavées depuis le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ont établi que lorsque les argilites sont exposées à l'atmosphère (*e.g.* en présence d'oxygène) et à la lixiviation par les eaux de pluie, les processus géochimiques suivants se produisent :

- l'oxydation des sulfures et la dissolution partielle des carbonates dont le pouvoir tampon permet de neutraliser sur le long terme l'acidité produite par l'oxydation des sulfures. L'oxydation des sulfures génère néanmoins des sulfates ;
- l'oxydation des pyrites et la minéralisation de la matière organique peuvent libérer les éléments traces métalliques qu'ils contiennent, dont les concentrations sont limitées, ces éléments étant rapidement réabsorbés par les minéraux secondaires formés.

Les argilites excavées mises en verses ne génèrent donc pas d'éléments chimiques toxiques (à l'état de traces). Les principales espèces susceptibles d'être relâchées sont des sulfates et des matières en suspension ainsi que quelques espèces ioniques cumulées dans les eaux de ruissellement et de percolation issues des verses.

La maîtrise de ces différents effluents susceptibles d'être relâchés est réalisée par une optimisation des performances hydrauliques des verses conçues pour minimiser les flux d'eau s'infiltrant dans les argilites et les échanges avec l'atmosphère.

Des études complémentaires relatives au comportement des verses sont ainsi prévues au cours de la phase de conception initiale, avec pour objet de conforter par des essais et au travers de modélisations les quantités de substances susceptibles d'être relâchées dans le milieu environnant afin d'optimiser le dimensionnement du système de traitement de ces eaux.

Plusieurs expérimentations sont ainsi prévues sur le comportement du dépôt d'argilites présent sur le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne :

- la première traite des eaux de ruissellement des verses en se plaçant dans des conditions proches de la mise en œuvre des verses telles que conçues. Les objectifs de cette expérimentation sont de :
  - ✓ consolider la filière de traitement des eaux de ruissellement des verses ;
  - ✓ définir les modalités et/ou les contraintes de montage des verses en adéquation avec la filière de traitement des eaux de ruissellement ;

- la seconde (*e.g.* EVA « eaux des verses d'argilites ») permet d'enrichir les connaissances sur l'altération/l'oxydation à la dimension d'une verse. Les objectifs sont les suivants :
  - ✓ disposer de données sur le fonctionnement hydrogéochimique des verses du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ;
  - ✓ tester des méthodes d'instrumentation et de chaînes de mesures et ainsi de conforter la faisabilité de mise en œuvre et du fonctionnement de la surveillance des eaux et des futures verses par la réalisation et l'instrumentation d'une verse « pilote » au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

2.3.3.2 Le comportement mécanique des verses

La hauteur des verses actuellement envisagée est de l'ordre de 20 mètres, correspondant à un remblai de grande hauteur, sur une superficie à terminaison d'environ 110 ha (bassins compris).

La caractérisation géotechnique des argilites du Callovo-Oxfordien pour leur mise en verses a été définie dans le cadre des études d'avant-projet. Les études ont permis également de vérifier les conditions de stabilité des talus.

En complément, des études spécifiques et complémentaires de stabilité sont à réaliser afin de préciser les conditions de mise en œuvre géotechnique pour la stabilité mécanique des verses dans le temps, comme le recommande le guide de terrassement routier (GTR) (38).

2.4 Les ouvrages de liaison

L'architecture souterraine est composée de grands blocs fonctionnels se déployant à partir de la base des ouvrages de liaison surface-fond (cf. Figure 2-15) :

- la zone de soutien logistique travaux (ZSLT) située à l'aplomb des puits travaux ;
- la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) située à l'aplomb des puits d'exploitation ;
- les quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs dans lesquels sont situés le quartier de stockage MA-VL et les quartiers pilote et de stockage HA ;
- un réseau de galeries de liaison mettant en connexion ces zones et quartiers.

Les premiers travaux de construction des ouvrages souterrains concernent les puits, les descenderies et les ouvrages de liaison souterrains permettant l'exploitation des premiers alvéoles du quartier de stockage MA-VL et du quartier pilote HA.

Les études de conception permettent de réaliser un ouvrage qui remplit parfaitement les fonctions qui lui sont assignées, en répondant aux exigences de sécurité et de durabilité, tout en respectant les objectifs du maître d'ouvrage en matière de coûts et de délais de réalisation.

L'architecture souterraine est ainsi déployée progressivement tout au long de l'exploitation du stockage sur une durée d'ordre séculaire. À une première phase de construction et d'exploitation se succéderont des phases de réalisations ultérieures (cf. Chapitre 3 du présent document). La conception prend en compte ce développement et se concentre tout d'abord sur la première tranche tout en vérifiant la compatibilité avec les développements des tranches ultérieures.

Après le creusement des descenderies, les tunneliers poursuivent le creusement des galeries de liaison du quartier de stockage MA-VL. Les zones de soutien logistique exploitation et travaux sont alors réalisées en parallèle des galeries de retour d'air du quartier de stockage MA-VL. Les galeries de liaison du quartier pilote HA puis les galeries du quartier lui-même sont réalisées, suivies des quatre premiers alvéoles MA-VL et en dernier les alvéoles du quartier pilote HA (cf. Figure 2-16).

Les ouvrages de liaison étant ainsi les premiers ouvrages réalisés dans l'installation souterraine, les actions relatives à la confortation de leur dimensionnement, de la démonstration de constructibilité et de la qualification de fonctionnement doivent être menées au plus tôt.

Par ailleurs, dans le cadre de la poursuite du développement ultérieur de l'installation, la réalisation de ces ouvrages ne doit pas préempter celle des ouvrages de liaison futurs.

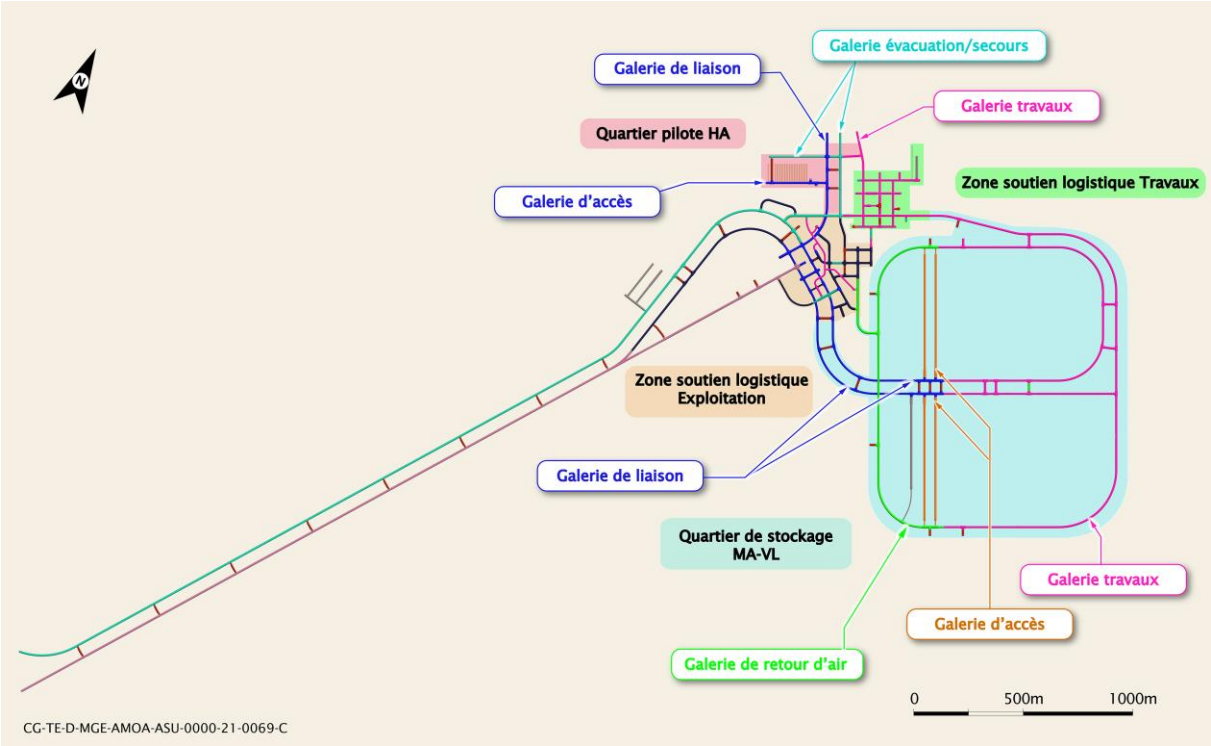


Figure 2-15 *Illustration de l'architecture souterraine de stockage Cigéo en tranche 1*

Figure 2-16 *Illustration du déploiement temporel de la première tranche de l'installation souterraine au cours de la phase industrielle pilote*

Le creusement des galeries d'accès aux alvéoles MA-VL des tranches ultérieures ainsi que les galeries de liaison et d'accès du quartier de stockage HA bénéficieront du retour d'expérience acquis lors de la réalisation des premiers ouvrages (cf. Chapitre 3 du présent document).

2.4.1 Les liaisons surface-fond

La conception et le dimensionnement des liaisons surface-fond présentés dans le dossier de demande d'autorisation de création résultent des différentes étapes du projet et des nombreux acquis de connaissances réalisés dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (cf. Encadré ci-dessous).

LES LIAISONS SURFACE-FOND

Les liaisons surface-fond sont constituées de deux descenderies et de cinq puits reliant respectivement la zone descenderie et la zone puits à la zone de soutien logistique exploitation et à la zone de soutien logistique travaux. La zone de soutien logistique exploitation est desservie par les deux descenderies et deux puits ; la zone de soutien logistique travaux est desservie par trois puits (cf. Figure 2-17).

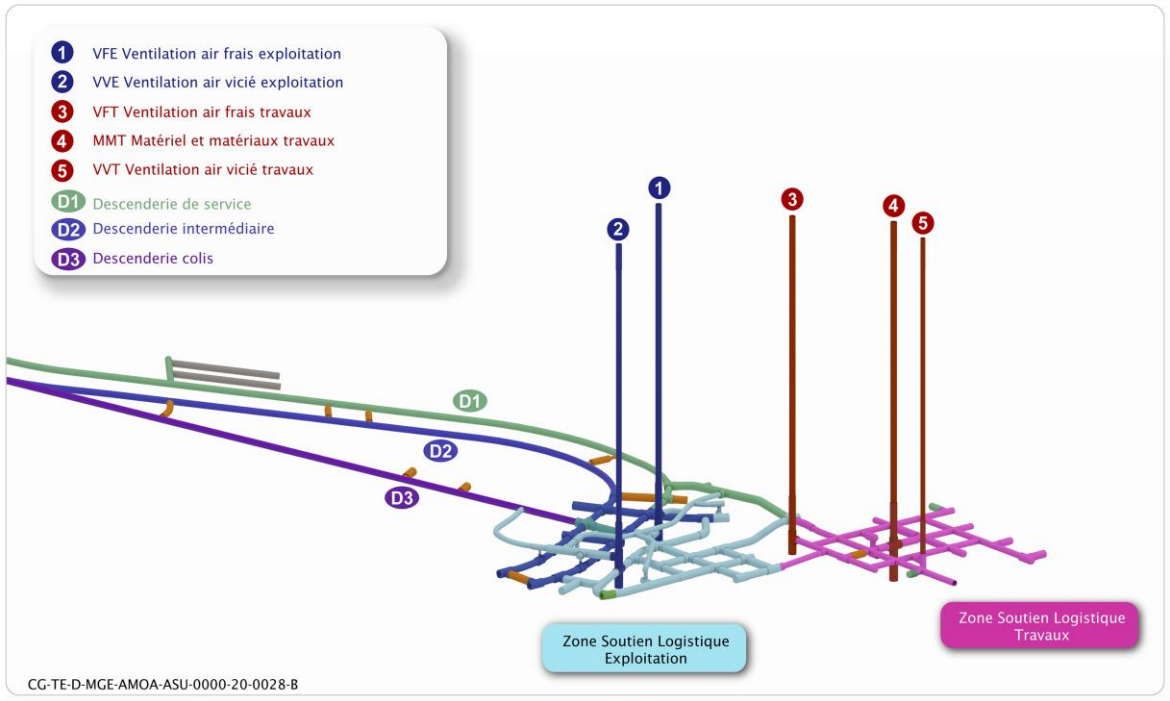


Figure 2-17 Schéma illustratif des puits et des descenderies

Les descenderies sont deux tunnels inclinés (12 %), d'environ 4 km, parallèles (distants de 60 mètres environ) et de même diamètre excavé (10 mètres environ) :

- la descenderie colis permet d'acheminer la hotte contenant les colis de déchets radioactifs vers la zone de soutien logistique exploitation 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 de service, dédiée aux fonctions d'exploitation est reliée à la zone de soutien logistique exploitation. Elle permet de réaliser les transferts liés à la maintenance, à l'acheminement de matériels et de matériaux, à l'évacuation des personnels et à l'accès des 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.

Les cinq puits ont des diamètres utiles variant entre 6 mètres et de l'ordre de 8 mètres et des longueurs entre 520 mètres et 560 mètres.

Les fonctions principales des trois puits desservant la zone de soutien logistique travaux et des deux puits desservant la zone de soutien logistique exploitation sont :

- le puits exploitation personnel, ventilation air frais (VFE) : il permet le transfert du personnel des installations de surface conventionnelles à la zone de soutien logistique exploitation et l'apport d'air frais aux ouvrages en exploitation ;
- le puits exploitation, ventilation air vicié (VVE) : il est dédié à l'extraction d'air vicié des ouvrages souterrains en exploitation ;
- le puits travaux personnel, ventilation air frais (VFT) : il permet le transfert du personnel des installations conventionnelles de surface à la zone de soutien logistique travaux, ainsi que l'apport d'air frais dans la zone travaux ;
- le puits travaux, ventilation air vicié (VVT) : il est dédié à l'extraction d'air vicié des ouvrages souterrains en travaux ;
- le puits travaux, matériels et matériaux (MMT) : il permet de transférer les équipements, les matériels et matériaux nécessaires aux travaux et d'acheminer vers la surface les déblais issus des excavations.

L'ensemble des liaisons surface-fond doit pouvoir être fermé et ainsi permettre la mise en place des ouvrages de fermeture de l'installation nucléaire Cigéo (cf. Chapitre 4 du présent document).

Les études relatives aux liaisons surface-fond se poursuivent en amont de la phase de construction initiale au regard de la confortation de la qualification de leur constructibilité.

Ces études se déclinent en particulier par des études d'optimisation des procédés de creusement. En effet, dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création, la méthode de fonçage de référence des cinq puits de l'installation nucléaire Cigéo est la méthode traditionnelle, dite de foration-tir. Cette méthode a déjà été mise en œuvre au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne pour la réalisation de deux puits de profondeurs équivalentes à ceux de l'installation souterraine de l'INB Cigéo et ne nécessite pas de complément de démonstration particulier.

L'Andra mène ainsi un travail de veille technologique pour évaluer la faisabilité et l'intérêt de toutes nouvelles solutions pour le creusement des ouvrages de liaison. En particulier, une étude a été lancée sur la réalisation des puits par la combinaison de deux nouvelles méthodes de fonçage (*Vertical Shaft sinking Machine – VSM et Shaft Boring Roadheader - SBR*) plus communément appelées « tunneliers verticaux » afin d'en évaluer la faisabilité et conforter son intérêt.

Les premiers résultats montrent qu'il n'y a pas d'impossibilité technique à la réalisation des puits de l'installation souterraine par la combinaison de ces méthodes. Cette étude a permis d'aboutir à une proposition combinant la méthode VSM pour la réalisation des avant-puits qui se trouvent dans les Calcaires du Barrois, ainsi que la méthode SBR pour la réalisation du corps des puits qui traversent le Kimméridgien, l'Oxfordien carbonaté et le Callovo-Oxfordien. En effet, la méthode VSM permet la réalisation des avants-puits en conception étanche, sans nécessiter d'abaissement du niveau de la nappe lors du creusement. La méthode SBR permet le fonçage du corps des puits sur toute la profondeur restante, avec un diamètre excavé variable permettant la mise en place des différents soutènements et revêtements nécessaires pour reprendre les contraintes des milieux géologiques traversés sans modification du diamètre utile. Combinée à l'usage ponctuel d'une haveuse à attaque ponctuelle installée sur la plateforme de mise en place du revêtement, commandée à distance, la méthode SBR permet également l'alésage nécessaire pour la réalisation des bulbes d'étanchéité et leur réalisation depuis les plateformes de la SBR.

En leur état actuel de développement, l'utilisation d'une méthode de creusement combinant la méthode VSM et la méthode SBR manque encore de retour d'expérience. L'Andra poursuit ainsi sa veille technologique dans le cadre d'une amélioration continue de ces méthodologies au travers de la collecte de retour d'expérience de chantiers récents recourant à ces méthodes spécifiques afin de pouvoir les mettre en œuvre dans le cas où elles constitueraient une amélioration.

Les études s'appuieront également sur l'ensemble des acquis de connaissance sur les milieux géologiques qui seront réalisés *in situ* au niveau des encaissants supérieurs de la couche du Callovo-Oxfordien (Calcaire du Barrois, cf. Chapitre 2.1.3 du présent document), Marnes du Kimméridgien et Oxfordien carbonaté (cf. Chapitre 2.1.4 du présent document).

2.4.2 Les galeries de l'installation souterraine

Les ouvrages souterrains sont principalement constitués de galeries réalisées selon différents modes de creusement (cf. Encadré ci-dessous).

Les nombreuses études de conception menées pendant les différentes phases du projet (esquisses, avant-projet sommaire et avant-projet détaillé) ont permis de concevoir et de dimensionner cette architecture souterraine (*e.g.* à la contrainte géostatique, à la contrainte thermo-hydro-mécanique, au séisme, etc.) en tenant compte des méthodes de creusement et de réalisation envisagées. Elles ont permis d'apporter les éléments permettant de justifier le respect des exigences de sûreté après fermeture (maîtrise de la zone fracturée à l'excavation), de stabilité des ouvrages souterrains sur la durée d'exploitation de l'installation et de sécurité dans les phases de chantier.

LES GALERIES DE L'INSTALLATION SOUTERRAINE ET LEURS MODES DE CREUSEMENT

Plusieurs modes de creusement ont été retenus pour réaliser les différents types de galeries de l'installation souterraine (cf. Figure 2-18).

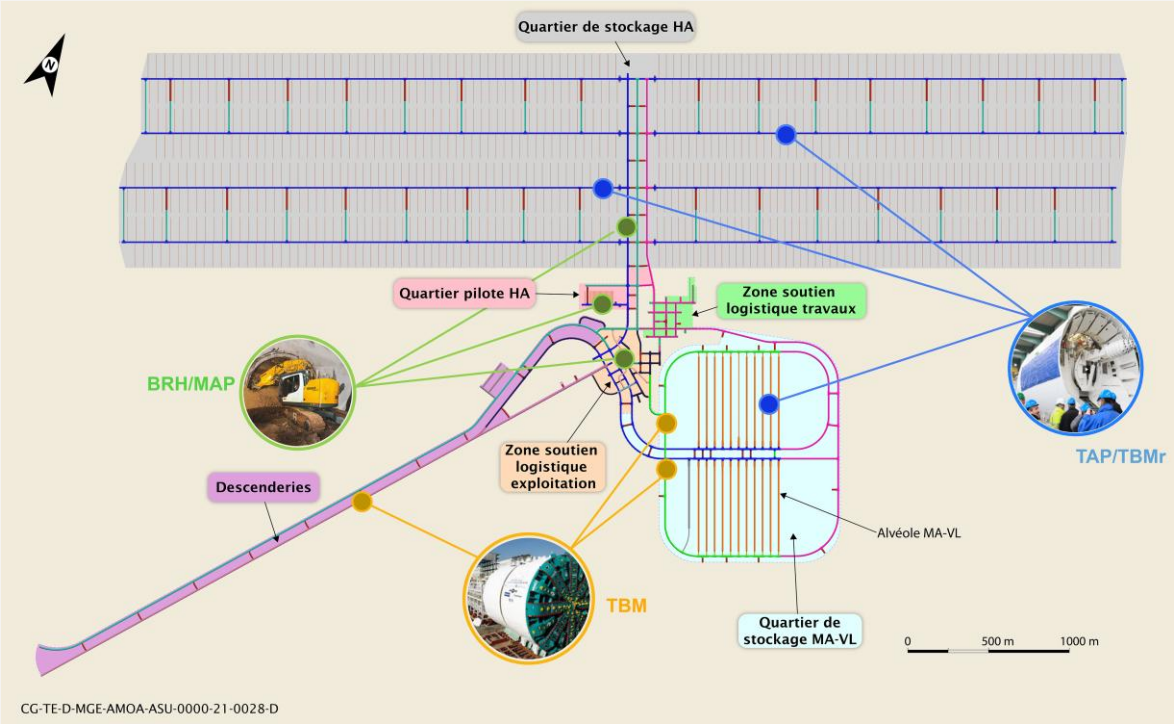


Figure 2-18 Plan d'architecture des ouvrages souterrains et modes de creusement envisagés

À l'arrivée au sein de la couche du Callovo-Oxfordien au niveau du stockage, les deux tunneliers (*Tunnel Boring Machine* (TBM)) ayant creusé les descenderies colis et de service poursuivent leur parcours pour réaliser l'ensemble des galeries de liaison du quartier de stockage MA-VL ainsi que les galeries travaux et les galeries de retour d'air du même quartier. Les alvéoles de stockage MA-VL seront creusés à l'aide d'un tunnelier à attaque ponctuelle (TAP) ou d'un tunnelier pleine face « rétractable » (TBMr). Leur revêtement est constitué de voussoirs.

Les autres ouvrages situés à proximité du pied des descenderies, notamment les galeries d'accès et d'évacuation/secours du quartier pilote HA, ainsi que les ouvrages de petit linéaire des zones de soutien logistique (exploitation et travaux), sont réalisés selon des méthodes traditionnelles : brise-roche hydraulique (BRH) et machine à attaque ponctuelle (MAP), avec des poses de revêtement conventionnel (boulonnage, béton projeté, revêtement coulé).

Les études se poursuivent dans le cadre d'une démarche de confortation du dimensionnement géomécanique et de la qualification de la constructibilité des galeries (cf. Chapitre 2.4.2.1 du présent document) et de leurs intersections (cf. Chapitre 2.4.2.2 du présent document).

2.4.2.1 La confortation du dimensionnement mécanique des soutènements des ouvrages souterrains et de leur constructibilité

Plus de 20 ans d'études menées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ont permis de caractériser le comportement géomécanique des soutènements des ouvrages souterrains réalisés dans le Callovo-Oxfordien en fonction de différents paramètres tels que le diamètre de l'excavation, l'orientation de l'ouvrage ou la méthode de creusement.

En effet, les techniques traditionnelles de creusement (foration-tir, machine à attaque ponctuelle, brise-roche hydraulique) et mécanisées (creusement au tunnelier) ont été testées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, associées à différents soutènements/revêtements souples (cintres coulissants et boulons, béton projeté et cales compressibles), rigides (béton projeté épais, béton coulé en place) ou anneaux de voussoirs (rigides ou compressibles), et leurs comportements mécaniques étudiés (cf. Encadré ci-dessous).

LE DIMENSIONNEMENT MÉCANIQUE DES REVETEMENTS DES OUVRAGES DE LIAISON SOUTERRAINS

Le chargement mécanique des revêtements est piloté par le comportement de la zone fracturée du Callovo-Oxfordien en champ proche, au travers de sa rigidité et de sa déformation (instantanée et différée). L'extension et la géométrie de cette zone endommagée dépendent significativement de l'orientation des ouvrages par rapport à la contrainte horizontale majeure (cf. Encadré ci-dessus au chapitre 2.1.5.2 du présent document).

La méthode de construction, par méthode dite « conventionnelle » avec un soutènement provisoire ou par méthode « mécanisée » avec un tunnelier, impacte aussi la cinétique de chargement du revêtement définitif coulé en place dans le premier cas, ou constitué de voussoirs dans le second cas.

L'introduction d'un matériau compressible entre le revêtement définitif et la roche contribue à retarder significativement son chargement différé et, dans une bien moindre mesure, à atténuer l'anisotropie de son chargement. L'utilisation d'un matériau compressible permet à la fois de réduire les épaisseurs et/ou le ferraillage du revêtement et d'accroître la durée de vie de l'ouvrage, en limitant l'accroissement des efforts mécaniques sur le revêtement induit par la convergence de la roche (cf. Figure 2-19).

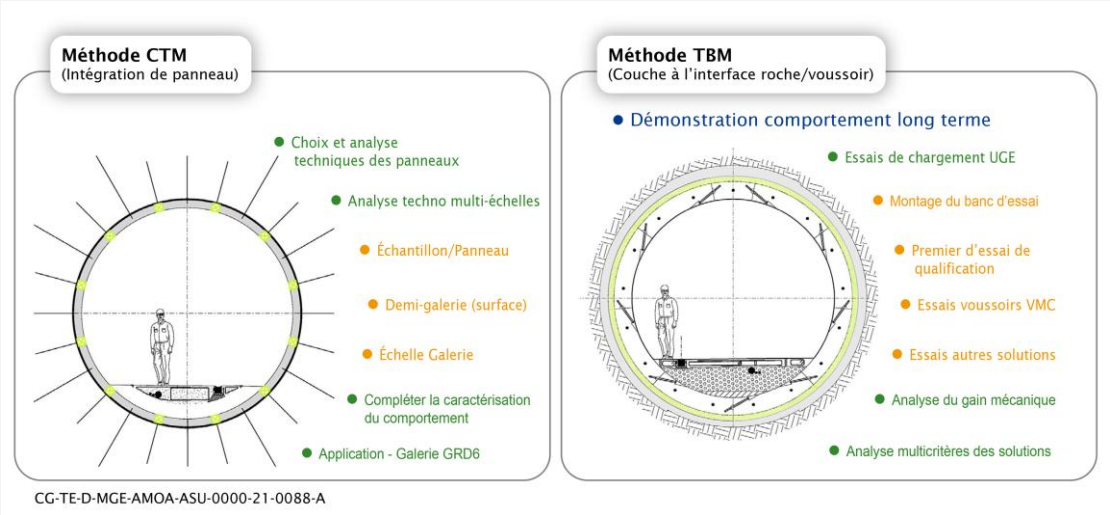


Figure 2-19 *Exemples de solutions de revêtement compressible testées et éprouvées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

La conception et le dimensionnement de ce matériau compressible s'appuient sur différentes études concernant le comportement de ce matériau menées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne tant au regard du suivi du comportement de revêtements souples que de celui de revêtements rigides (mortier compressible et voussoir en béton avec une couche de matériau compressible (le voussoir compressible)) ainsi que sur différentes modélisations numériques avec des vérifications des sollicitations dans le soutènement et le revêtement.

Ces études ont mis en évidence l'importance de ce comportement sur les épaisseurs de revêtement nécessaires pour satisfaire les critères de dimensionnement.

En complément du suivi du comportement des différents ouvrages réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et de leur champ proche qui se poursuit et concourt à conforter l'état des connaissances acquises, d'autres solutions techniques sont en cours de développement avec des essais de caractérisation et de qualification multi-échelle et permettront d'orienter le choix des matériaux compressibles du point de vue technico-économique.

Ces études complémentaires concernent le comportement de différents matériaux compressibles ainsi que les essais de mise en œuvre au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne afin d'affiner le dimensionnement mécanique des ouvrages souterrains de l'installation nucléaire Cigéo et leurs méthodes de mise en œuvre. Elles se déclinent selon la nature du mode de creusement et du revêtement associé, c'est-à-dire par méthode traditionnelle (cf. Chapitre 2.4.2.1.1 du présent document) ou par tunnelier (cf. Chapitre 2.4.2.1.2 du présent document).

2.4.2.1.1 Les ouvrages réalisés par méthode traditionnelle

Concernant les ouvrages construits par méthode traditionnelle, des travaux sont programmés dans le cadre de l'expérimentation Ouvrage MA-VL (OMA) visant à réaliser un ouvrage d'une dimension similaire à celle d'un alvéole de déchets MA-VL. Cette expérimentation a pour objet d'apporter des éléments complémentaires et probants pour conforter la connaissance du comportement de la roche et du soutènement/revêtement à une échelle d'ouvrage proche de celle des ouvrages de l'installation nucléaire Cigéo (cf. Chapitre 2.7 du présent document).

L'expérimentation OMA est complétée par :

- des essais préalables de caractérisation et d'adaptation de trois types de panneaux préfabriqués menés en surface (différents modes de chargement, choix du mode de fixation). Des essais complémentaires de tapissage et coulage sur une structure en surface simulant une contre-voûte de galerie (5 mètres de diamètre) sont en cours ;
- l'expérimentation RTC (revêtement traditionnel avec une couche compressible) au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne sur les matériaux compressibles testés en surface. Elle concerne leur mise en place sous forme de plaques préfabriquées pour la réalisation d'un soutènement/revêtement en méthode de creusement traditionnelle, après adaptation de la géométrie (épaisseur, surface, mode de manutention et fixation) et le suivi de leur comportement mécanique.

2.4.2.1.2 Les ouvrages réalisés par tunnelier

Pour la méthode de creusement mécanisée au tunnelier, la solution d'un mortier compressible a été testée dans les galeries du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Le retour d'expérience du comportement mécanique montre que ce mortier joue son rôle en diminuant les contraintes dans les anneaux de voussoirs par rapport au cas où un mortier classique a été utilisé.

Cependant pour mieux garantir l'homogénéité et la bonne épaisseur à l'extrados des voussoirs de la couche compressible, le voussoir compressible VMC® a été développé. Ce type de voussoir a été mis en place avec succès au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, montrant ainsi la faisabilité industrielle de mise en œuvre et l'effet du matériau compressible. Si, dans la version testée dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, la couche compressible a été réalisée à partir de coques d'argilites cuites agglomérées avec une barbotine cimentaire, d'autres matériaux présentant un comportement mécanique équivalent voire avec un palier plastique plus long peuvent être intégrés dans des voussoirs bicouches.

L'Andra a voulu conforter la robustesse du fonctionnement des voussoirs bicouches en s'associant avec l'université Gustave Eiffel (ex IFSTTAR[24]) en développant un banc d'essais permettant de tester des anneaux de voussoirs compressibles de six mètres de diamètre (diamètre équivalent à ceux testés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne) en simulant la convergence du terrain par des vérins de fortes capacités. Ce système permet de reproduire la convergence à court et long terme pour montrer la robustesse du fonctionnement des voussoirs.

Quatre premiers essais ont été réalisés, incluant le test de qualification (cf. Figure 2-20), sur des voussoirs VMC® identiques à ceux testés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les essais vont se poursuivre sur des voussoirs VMC® puis avec d'autres types de matériau compressible alternatif.

[24] IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

Ces deux types de matériau compressible alternatif consistent à reconstituer (par méthode robotisée) une couche multi-blocs compressible à l'extrados d'un voussoir :

- solution béton léger (Andra/CERIB[25]) concernant l'utilisation pour ces blocs de béton mousse ou de béton cellulaire autoclavé. Une première campagne d'essais mécanique et de mode de mise en place a confirmé l'intérêt de ce type de matériau. Actuellement, une meilleure optimisation du comportement mécanique de ces blocs est en cours ;
- solution de voussoir à air préfabriqué (VAP) consiste à pré fabriquer des blocs en matériau cimentaire (pressés) ou en terre cuite (par extrusion) comportant une architecture spécifique avec des vides permettant d'obtenir le comportement souhaité. Des essais de comportement mécanique ainsi qu'une analyse technologique sont menés en parallèle. Des premières solutions optimales ont été identifiées et testées.

Des blocs provenant de ces deux solutions seront mis en place à l'extrados d'un anneau de voussoirs au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, testés et comparés à la solution VMC® lors d'un essai en surface sur la dalle d'IFSTTAR. Par la suite, des essais d'optimisation technologique sur la fabrication/mise en œuvre et la formulation seront réalisés.

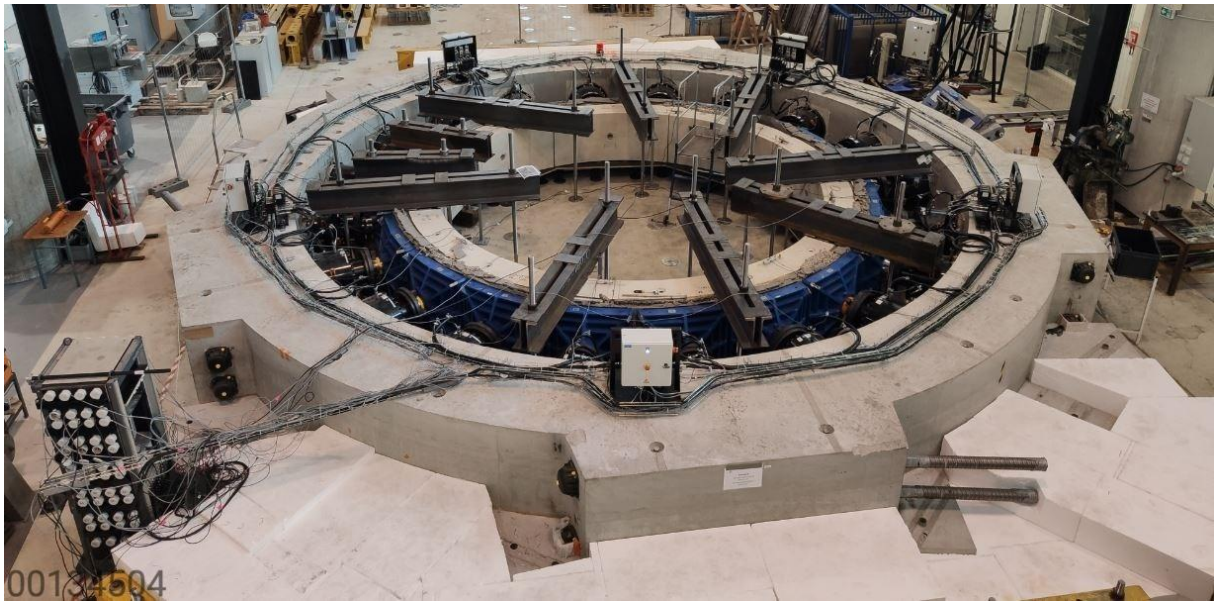


Figure 2-20 Photographie de l'essai de chargement accéléré d'anneau de voussoirs compressibles mené à l'université Gustave Eiffel

2.4.2.2 La confortation du dimensionnement et de la constructibilité des intersections des ouvrages souterrains

Le creusement des ouvrages souterrains implique la réalisation de nombreuses intersections, en « T » ou en « X » (cf. Encadré ci-dessous), notamment dans le quartier de stockage MA-VL.

La principale spécificité de ces intersections tient au fait que le diamètre de la galerie secondaire est voisin du diamètre de la galerie principale. Même si elle a été testée au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, cette configuration reste assez rare dans le milieu des ouvrages souterrains avec peu de retour d'expérience, les sections des galeries secondaires étant généralement de plus petites dimensions en regard de la section de la galerie principale.

[25] CERIB : Centre d'études et de recherche d'industrie du béton

LES INTERSECTIONS DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

De nombreuses intersections de galeries (ou carrures) sont prévues dans l'architecture souterraine (*e.g.* 54 intersections en tranche 1) (cf. Figure 2-21).

Au stade actuel des études, deux scénarios de développement des travaux ont été analysés intégrant un nombre variable de carrures à réaliser dans le quartier de stockage MA-VL de la tranche 1 :

- dans le premier scénario pour une réalisation au juste besoin, avec cinq alvéoles de stockage (dont un démonstrateur), le nombre de carrures est de 54 soit au total ~1 300 ml de voussoirs à déposer ;
- dans le second scénario pour une anticipation des amorces des futurs alvéoles, avec donc 23 alvéoles (dont toujours un démonstrateur), 18 carrures supplémentaires sont à réaliser soit 72 au total et ~2 000 ml de voussoirs à déposer.

Sur la base des études d'avant-projet, chaque intersection réalisée dans les argilites du Callovo-Oxfordien nécessite une dépose des voussoirs déjà chargés par le terrain, une sur-excavation d'environ deux mètres au diamètre dans des matériaux possiblement remaniés, un soutènement provisoire (composé de boulons et de béton projeté) et la mise en place d'un matériau compressible puis d'un revêtement coulé en place.

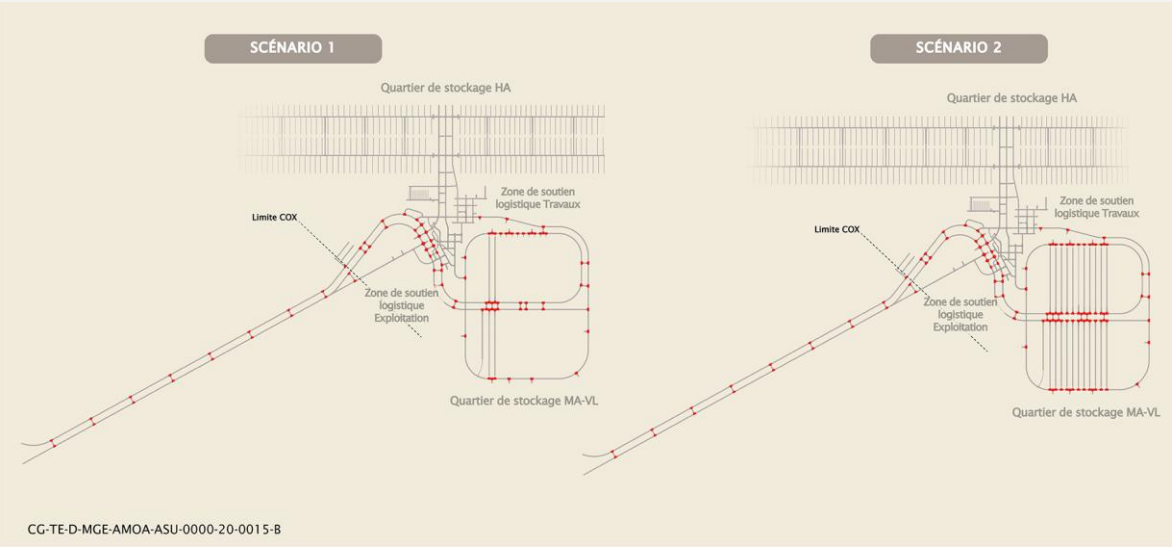


Figure 2-21 *Illustration du nombre d'intersections en tranche 1 (T1) – Scénario 1 avec 54 intersections à réaliser au minimum en T1 et scénario 2 avec 72 intersections à réaliser au maximum en T1*

En termes de construction, les nombreux carrefours en « T » déjà réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne fournissent un retour d'expérience notable et la réalisation récente d'un carrefour de taille importante (*e.g.* avec transition conique entre un ouvrage de six mètres de diamètre à un ouvrage de neuf mètres de diamètre) montre aussi la capacité à construire des carrefours de taille plus proche de ceux qui sont prévus à l'échelle des ouvrages souterrains de l'installation nucléaire Cigéo.

Les modalités précises de réalisation de ces opérations complexes restent encore à définir. Les retours d'expérience d'autres grands projets d'infrastructures et des expérimentations réalisées à ce jour au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ont permis de vérifier qu'il n'y avait pas de difficulté technologique de construction particulière mais plutôt des contraintes liées à la sécurité opérationnelle lors du creusement et à l'optimisation de la logistique des travaux et, par conséquent, au planning et au coût, à bien appréhender.

Dans le cadre de cette optimisation technique des intersections, des études complémentaires sont menées avec des entreprises qui ont proposé différentes solutions techniques avec l'utilisation d'équipements adaptés pour réaliser les intersections de façon « semi-mécanisée » ou totalement mécanisée avec un tunnelier de plus grand diamètre, pour la construction du quartier de stockage MA-VL. Les actions prévues ont ainsi pour objet :

- de conforter la faisabilité technologique de la réalisation des intersections dans le cadre du contexte industriel de l'INB Cigéo *via* une méthode de type industriel ;
- de poursuivre l'acquisition des connaissances sur le développement des méthodes constructives des intersections (machines/équipements).

L'Andra poursuit ainsi les travaux engagés début 2019 au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne en confortant les acquis quant à :

- la capacité à déposer les voussoirs (en partie courante et en carrure en « T ») ;
- l'emploi des matériaux compressibles en tant que disposition de référence pour un dimensionnement optimisé des ouvrages, en particulier pour les carrefours en « X » tels que prévus pour les zones de soutien logistique.

Ainsi, un programme spécifique est prévu pour les études complémentaires concernant la réalisation des intersections dans l'installation souterraine.

Ce programme permettra de préciser les futures phases du projet afin d'accroître la sécurité opérationnelle pendant les travaux et d'optimiser les aspects liés à la technique de construction, à la logistique, au planning et au coût.

Enfin, la réalisation d'une seconde carrure en « X » au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne fournira également des données supplémentaires pour conforter et autant que possible optimiser les dimensionnements actuels des soutènements/revêtements des intersections de l'installation nucléaire Cigéo. Cette carrure fera également l'objet d'un suivi hydro-mécanique important.

2.4.3 La descente de béton, de fluide(s) ou de granulats par un forage vertical ou une canalisation en puits

Il est prévu de fabriquer le béton en surface. L'acheminement du béton dans les infrastructures fond de l'installation nucléaire Cigéo comporte alors deux phases importantes :

- la descente du béton depuis la surface jusqu'au fond ;
- le transport horizontal du béton dans les galeries.

Actuellement, il est envisagé de faire transiter le béton nécessaire à la construction des infrastructures fond par les liaisons surface-fond (emploi de camions toupies par les descenderies ou de bennes en puits), ce qui induit des contraintes de sécurité (en descenderie) et/ou de flux (en puits). Or, des quantités très importantes de béton devront être mises en place pour la construction de la tranche 1 ainsi que des tranches ultérieures des ouvrages souterrains.

Toutefois, l'acheminement du béton depuis la surface pourrait être réalisé à l'aide d'une canalisation fixée à l'intérieur d'un forage vertical réalisé à l'aplomb de la zone de soutien logistique travaux. Ce dispositif de transfert vertical permettrait d'augmenter les débits de production des bétons, d'améliorer les rendements des ateliers de génie civil et de raccourcir très significativement les délais d'acheminement des bétons surtout lors des périodes d'intense bétonnage.

Les premières actions entreprises ont ainsi consisté à développer une formulation de béton haute performance, autoplaçante et pompable avec une durée pratique d'utilisation de quatre heures. Par la suite, un forage à tube métallique rigide a été réalisé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne équipé de systèmes permettant d'introduire le béton depuis la surface, de contrôler sa descente et sa récupération. Différents essais ont alors été réalisés avec de l'eau puis la formulation de béton.

Par la suite, les essais vont se poursuivre afin de tester un autre mode d'acheminement *via* un flexible logé à l'intérieur d'un tubage. Ce système permet une plus grande flexibilité de transfert du béton. En cas de dysfonctionnement ou de blocage du béton, il est toujours possible d'extraire le flexible par un système « enrouleur ».

Ainsi pour préciser les éléments techniques et économiques relatifs à l'installation d'un tel dispositif, l'Andra procédera à une campagne d'essais en vue d'évaluer le cycle de vie d'un tel équipement mais aussi de compiler les informations concernant le matériau constitutif du flexible et sa durabilité (résistance à l'abrasion) pour choisir un modèle adapté.

Si l'intérêt d'un tel dispositif est confirmé, un essai de fermeture sera réalisé. À ce stade, la faisabilité de principe de la fermeture a été vérifiée sur la base de techniques pétrolières existantes, ainsi que de travaux réalisés par les homologues de l'Andra, notamment pour des formations argileuses.

2.4.4 La surveillance des ouvrages de liaison

Les principales fonctions des ouvrages de liaison consistent à permettre le transfert des colis de déchets, des matériels et des personnes. Par ailleurs, ces ouvrages doivent pouvoir être fermés et ainsi une partie d'entre eux doivent pouvoir accueillir les ouvrages de fermeture de l'installation nucléaire Cigéo (cf. Chapitre 4 du présent document).

Dans ce cadre, la surveillance des ouvrages de liaison porte principalement sur le suivi de leur évolution géomécanique dans les conditions attendues (cf. Encadré ci-dessous) ainsi que sur l'évolution géomécanique des argilites du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.1.5.3 du présent document).

La surveillance des ouvrages de liaison se décline par la mise en place de sections instrumentées permettant de suivre leur évolution géomécanique ainsi que l'ensemble des paramètres environnementaux d'intérêt (température, hygrométrie, etc.).

LA SURVEILLANCE DE L'ÉVOLUTION GÉOMÉCANIQUE DES OUVRAGES

La surveillance de l'évolution géomécanique des ouvrages cimentaire de grand diamètre bénéficie d'un important corpus de connaissance constitué d'une part d'une base importante d'informations bibliographiques concernant l'instrumentation des ouvrages d'art comme des barrages, tunnels, ponts depuis environ un siècle et, d'autre part, d'un retour d'expérience propre à l'Andra, obtenu dans les Laboratoires souterrains de nos homologues étrangers dans le cadre d'expérimentations communes ou au travers des mesures sur des structures en béton qu'elle a instrumentées comme par exemple les galeries du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse-Haute-Marne. Par ailleurs, l'Andra a participé, *via* des collaborations, aux instrumentations de structures en béton de EDF sur la maquette VERCORS (« VErification Réaliste du COnfinement des RéacteurS »), de RTE sur des fondations de pylônes et de l'IRSN à Tournemire.

L'Andra a ainsi réalisé des expérimentations de sections de revêtement/soutènement types de galerie et d'alvéole MA-VL (ORS (observation et comportement des revêtements/soutènements), GCR, GER, GRD, GVA au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne). Ces expérimentations scientifiques ont permis de (i) vérifier la tenue dans le temps des capteurs, (ii) tester des technologies différentes et de les comparer entre elles et avec les mesures en environnement contrôlé, (iii) tester de nouvelles configurations ou nouveaux équipements, (iv) valider les protocoles de mise en œuvre et (v) contribuer à évaluer les coûts et définir les modalités d'interface avec les travaux d'exploitation.

L'instrumentation mise en place dans la roche et le revêtement en béton coulé en place est composée de capteurs éprouvés (sondes TDR (*Time Domain Reflectometry*), extensomètres à corde vibrante, cellules de pression interstitielle) et de capteurs plus innovants (fibres optiques pour les mesures de température et de déformation, tapis sensitif pour cartographier la contrainte orthoradiale).

À titre d'illustration, l'Andra a mené deux axes de développement sur les extensomètres à corde vibrante (ECV), qui bénéficient d'un retour d'expérience très important d'utilisation dans les ouvrages en béton du génie civil : l'étalonnage (en partenariat avec le Laboratoire national d'essai) et le durcissement vis-à-vis des radiations (cas des alvéoles MA-VL). Les retours d'expérience accumulés ont montré que les extensomètres à corde vibrante permettent de fournir des mesures de déformations sur plusieurs décennies (39).

La technologie éprouvée des ECV est avantageusement complétée par des mesures réparties de déformations. Des fibres optiques ont été noyées dans des structures en béton à l'espace technologique, en GCR et en GER au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, dans le Laboratoire souterrain HADES (Belgique), à Tournemire (collaboration IRSN dans le projet Modern2020), dans l'EPRet sur VERCORS, en collaboration avec EDF. La sensibilité de la mesure et la résolution spatiale sont désormais en parfait accord avec les besoins de mesure : les fibres optiques fournissent des mesures réparties de déformations sur des linéaires de plusieurs centaines de mètres, avec une sensibilité inférieure à 10 µm/m, tous les 10 cm.

Les études concernant les dispositifs de surveillance de ces ouvrages ont ainsi pour objet de poursuivre leur amélioration dans le cadre de la démarche d'amélioration continue des connaissances en particulier au regard de leur discrétion et de leur durabilité.

Les développements des IA sur les systèmes robotisés en vue d'une autonomie prévoient un suivi des convergences de galerie, une surveillance de l'apparition d'éventuelles fissures et une acquisition de métadonnées liées à la réalisation des ouvrages (incluant des données liées la reconnaissance au front de creusement et aux travaux) en vue de contribuer efficacement à l'établissement de jumeaux numériques en fournissant des données systématiques et structurées.

Une partie de ces études sont mutualisées avec celles dédiées à la surveillance du comportement géomécanique des alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.7.4.4 du présent document), en particulier dans le cadre de l'expérimentation OMA.

2.5 Le process nucléaire

2.5.1 Le développement des composants clés du process nucléaire

Le process nucléaire couvre l'ensemble des opérations de manutention à partir de la réception des colis de déchets dans le bâtiment nucléaire de surface EP1 jusqu'à la mise à disposition des colis en entrée des alvéoles de stockage pour les colis MA-VL et jusqu'à la position de stockage définitive pour les colis HA.

La majorité des équipements participant au process nucléaire de l'installation nucléaire Cigéo sont des équipements considérés comme « standards » c'est-à-dire déjà mis en œuvre dans des installations nucléaires de base. Leur conception, développement et qualification s'appuient sur le retour d'expérience d'essais technologiques, d'autres installations nucléaires ou d'installations industrielles. Il s'agit d'un processus classique de développement dont les actions ne sont pas détaillées ici. C'est en particulier le cas pour les composants du process nucléaire du bâtiment EP1 qui ne sont pas abordés dans ce document.

Certains équipements du process nucléaire souterrain présentent des spécificités au regard de la singularité de l'INB Cigéo. Ces spécificités sont de plusieurs natures : par exemple, leurs dimensions, leur mise en œuvre en souterrain ou bien nouvelle.

Ce sont en particulier : le funiculaire de la descenderie colis (cf. Chapitre 2.5.2 du présent document), les hottes de transfert des colis et leur processus d'accostage (cf. Chapitre 2.5.3 du présent document), le pont stockeur (cf. Chapitre 2.5.4 du présent document) et le robot bride (cf. Chapitre 2.5.5 du présent document).

La conception de ces composants spécifiques du process nucléaire suit le même processus d'itérations sûreté/conception/connaissance que celle des autres composants de l'INB. Par la suite, leur construction et la qualification de leur fonctionnement se déclinent selon des étapes progressives avec la réalisation/qualification de leurs sous-composants puis du composant dans sa globalité.

Les actions principales résultent du besoin de conforter la démonstration de l'atteinte des performances de ces composants spécifiques et de la capacité à intervenir sur toutes situations de blocage éventuelles ainsi que de leur maintenance dans un environnement contraint. Ces actions sont mises en œuvre avant la phase de construction initiale.

2.5.2 Les composants du funiculaire

Dès le début de la conception, l'Andra a recherché les solutions techniques existantes et les a analysées en regard des spécificités de l'installation de stockage en couche géologique profonde en particulier pour la phase de transfert des colis de déchets radioactifs de la surface vers les ouvrages souterrains. Ainsi le choix des équipements a évolué au fur et à mesure du développement de la conception et des choix d'implantation des installations.

Le transfert des colis de déchets dans la descenderie colis est considéré par l'Andra comme un enjeu stratégique et structurant pour la sûreté. Ce caractère stratégique et innovant de la descenderie colis a conduit l'Andra à structurer depuis 2008 sa démarche d'études internes et externes de recherche de solutions de façon progressive et suivant plusieurs axes, suivies par des analyses comparatives incluant plusieurs critères, notamment la sûreté, le risque incendie, les facteurs organisationnels et humains, la simplicité et la robustesse, le retour d'expérience, la fiabilité, la disponibilité, etc.

L'analyse menée sur un panel de solutions possibles a conduit à retenir le système de transfert par câble de type funiculaire comme solution de référence. Cette solution, présentée dans le dossier de demande d'autorisation de création, répond au mieux à l'ensemble des exigences et des critères de comparaison des différentes options (cf. Encadré ci-dessous). Ce choix du funiculaire a été conforté par un retour d'expérience important sur le fonctionnement de funiculaires au niveau national et international.

LE FUNICULAIRE

Le système funiculaire, constitué d'un véhicule, d'une machinerie et d'un câble, permet d'acheminer les hottes le long d'un tunnel incliné et rectiligne entre la gare haute située dans la tête de descenderie en surface jusqu'à la gare basse située en souterrain au pied de la descenderie (cf. Figure 2-22).

Le véhicule qui transporte la hotte se déplace sur ses rails par entraînement d'un câble selon le principe d'une boucle mouflée[26]. La machinerie du système funiculaire est localisée en surface. Le véhicule dispose de deux systèmes de freinage d'urgence embarqués. Des butoirs de fin de voie à effet amorti ont pour fonction d'arrêter le véhicule en cas de non-arrêt lors de son entrée en gare (haute et basse).

[26] Le mouflage est un système de hissage permettant de réduire l'effort nécessaire pour soulever une charge. L'avantage mécanique obtenu est basé sur la théorie de l'effet poulie.

Figure 2-22 Illustration du véhicule funiculaire chargé d'une hotte MA-VL

Parmi les composants du funiculaire nécessitant d'être qualifiés, les systèmes de freinage d'urgence du funiculaire sont des éléments importants pour la protection des intérêts (EIP) et des composants dont il n'existe pas d'autre exemple de réalisation pouvant servir d'analogie directe. Ainsi, en application de la démarche de l'Andra pour la qualification d'un EIP (cf. Chapitre 1.4.4 du présent document), des actions ont été mises en place afin de monter en maturité ce composant (cf. Encadré ci-dessous).

LE BANC D'ESSAIS

Un banc d'essais a été réalisé à Froncles. Ce banc d'essai a permis de tester les systèmes de freinage (les composants et les logiciels) pour vérifier l'opérabilité des systèmes intégrés dans la conception et l'atteinte des performances attendues.

À ce jour, la construction de ce banc d'essai d'échelle 1 a permis de valider les processus de fabrication. Ce banc d'essais a permis de tester sur les systèmes de freinage d'urgence embarqués et le butoir fin de voie (cf. Figure 2-23) :

- la performance du freinage (effort de freinage, temps de déclenchement) ;
- la fiabilité en particulier du contrôle commande (seuil de déclenchement, algorithme pour le déclenchement du freinage, déclenchement non intempestif, etc.) en situations normales et dégradées (pertes d'utilités, etc.).

Figure 2-23 Photographie du banc d'essai du système de freinage du funiculaire

Par la suite, les composants du funiculaire suivront un processus de consolidation de la conception en fonction des évolutions technologiques (*e.g.* contrôle commande) d'ici la mise en service et des évolutions potentielles des exigences de conception.

2.5.3 Les hottes MA-VL et leur système d'accostage

Le transfert des colis MA-VL du bâtiment nucléaire de surface EP1 jusqu'à sa mise en place dans l'alvéole de stockage s'effectue au moyen d'une hotte de transfert. Pour permettre le chargement du colis, la hotte est accostée à une façade d'accostage située dans le bâtiment EP1.

Puis, après son transfert vers les installations souterraines, la hotte est accostée à la façade d'accostage de l'alvéole MA-VL afin de permettre le transfert du colis dans la cellule de manutention.

Les hottes et les façades d'accostage permettent de garantir la sécurité des opérateurs et la sûreté de l'installation lors du transfert des colis (cf. Encadré ci-dessous).

LES FONCTIONS DES HOTTES MA-VL ET LES FAÇADES D'ACCOSTAGE

La hotte MA-VL permet de protéger les opérateurs vis-à-vis du risque d'exposition interne et externe et également de protéger le colis MA-VL qu'elle contient lors de son transfert dans l'installation nucléaire et lors du déchargement du colis en cellule de manutention, avant stockage en alvéole.

La hotte MA-VL a été conçue notamment comme une enceinte permettant le confinement, d'atténuer les rayonnements et dotée d'une protection thermique (cf. Figure 2-24).

La hotte MA-VL chargée d'un colis et en configuration porte fermée assure le deuxième système de confinement statique[27] pendant son transfert (depuis la façade d'accostage dans le bâtiment nucléaire de surface jusqu'à la façade d'accostage des alvéoles MA-VL).

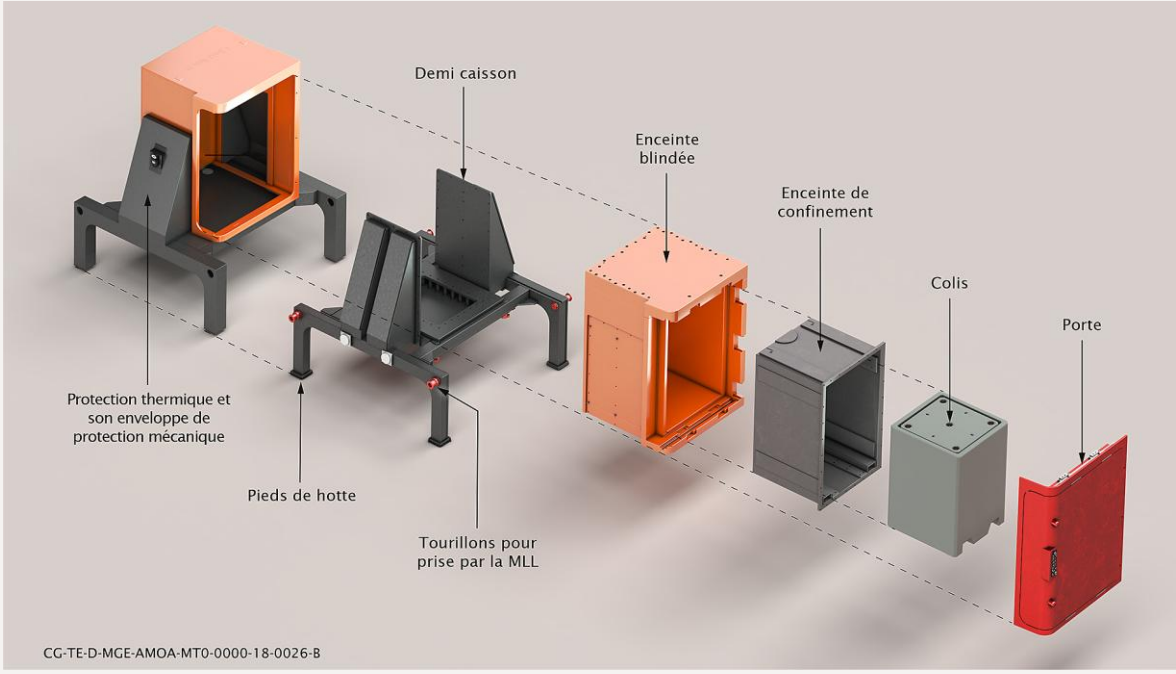


Figure 2-24 Illustration de la conception d'une hotte de transfert MA-VL

Lorsque la hotte MA-VL est accostée à une façade d'accostage, en configuration porte ouverte, le couplage « hotte + façade d'accostage » permet d'assurer la continuité du confinement à l'aide de joints gonflables entre la hotte et l'alvéole équipé de ladite façade d'accostage, ainsi que la continuité de la protection radiologique (cf. Figure 2-25).

Ces joints sont encadrés par des joints intumescents pour les protéger en cas d'incendie.

La façade d'accostage permet de protéger les opérateurs vis-à-vis du risque d'exposition interne et externe en l'absence de hotte.

[27] La maîtrise du risque de dissémination de substances radioactives est assurée par la mise en place de barrières et de systèmes de confinement passifs et actifs entre les radionucléides et l'environnement. Un premier système de confinement est conçu pour assurer un confinement aussi total que possible (ex. Le colis) (10).

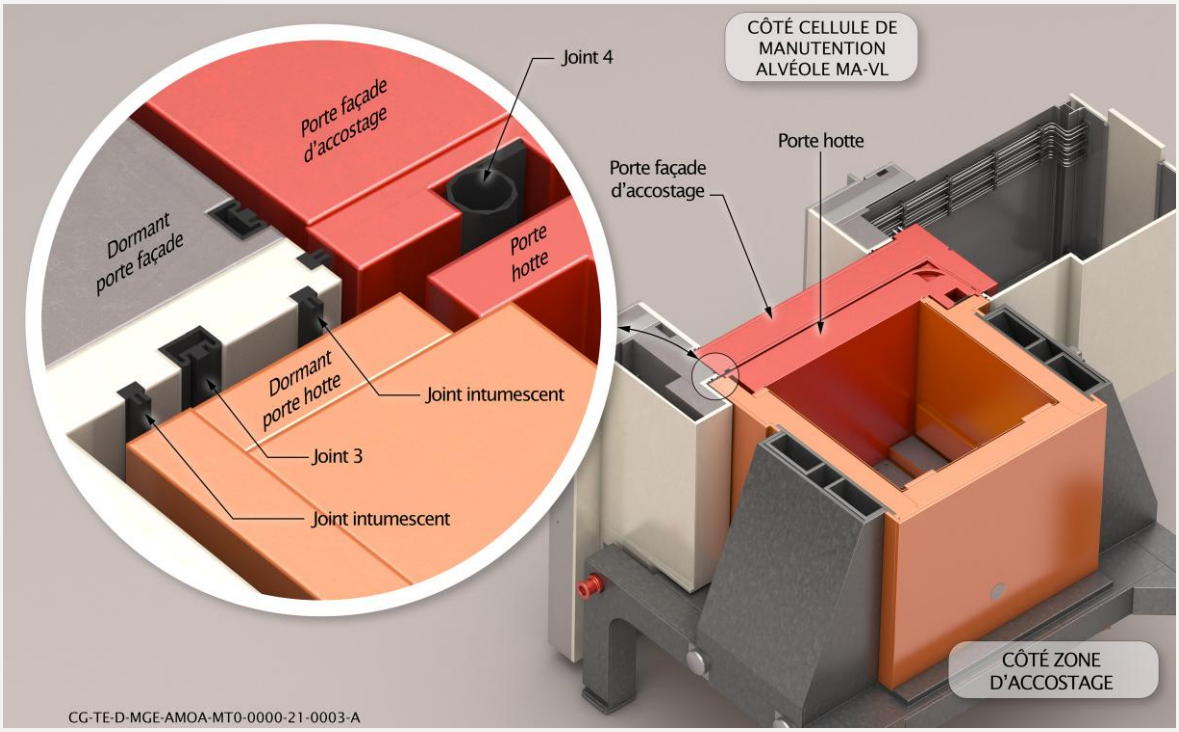


Figure 2-25 *Illustration du système d'étanchéité entre la hotte de transfert et la paroi d'accostage*

Ainsi, en application de la démarche de l'Andra pour la qualification d'un EIP (cf. Chapitre 1.4.4 du présent document), la qualification des hottes de transfert des colis MA-VL et de leur fonctionnement est réalisée par étapes jusqu'à la qualification finale. Au regard de ses fonctions de sûreté, la hotte de transfert des colis MA-VL doit être ainsi qualifiée pour le confinement (hotte seule et hotte accostée) et vis-à-vis des risques incendie et de chute.

Compte tenu des géométries des joints, des taux de fuites admissibles et des systèmes de verrouillage (cf. Encadré ci-dessus), il est nécessaire de réaliser des essais de qualification des systèmes d'étanchéité des hottes MA-VL et des façades d'accostage associées. Les essais à mener concerneront en premier lieu la qualification des performances de confinement du système « hotte + façade d'accostage », puis en des essais sur les hottes seules, sur la façade d'accostage seule, et enfin sur les deux accostées. Une première étape de démonstration consistera en particulier à caractériser les performances de confinement des joints de la hotte et de la façade d'accostage en pleine échelle.

La suite des essais pour la qualification des hottes MA-VL et de la façade d'accostage se poursuivra par des études et essais de tenues à l'incendie et à la chute sur des prototypes représentatifs des composants définitifs (géométrie, matière, etc.).

2.5.4 Le pont stockeur

Pour la mise en place des colis MA-VL en alvéole et, s'il y a lieu, leur retrait, la solution d'un pont stockeur permettant un stockage par nappe est retenue pour tous les alvéoles sauf celui destiné au stockage des colis de type CS6 (cf. Encadré ci-dessous).

La mise en œuvre d'un tel composant dans les conditions souterraines de stockage conduit à la mise en place d'une démarche de développement permettant de qualifier *in fine* son fonctionnement dans les conditions industrielles d'exploitation de l'installation nucléaire Cigéo.

LE PONT STOCKEUR

Le principe du pont stockeur est inspiré des ponts gerbeurs déjà utilisés dans l'industrie conventionnelle. Il a été adapté aux conditions particulières de l'environnement nucléaire souterrain Cigéo.

Le pont stockeur permet la mise en place et le retrait des colis en partie utile de l'alvéole. Cette mise en place s'effectue par nappe (du fond vers la tête de l'alvéole) (cf. Figure 2-26).

Le pont stockeur permet de minimiser les risques en exploitation, notamment les risques de chute de colis et les conséquences d'un incendie.

Le pont stockeur permet de maîtriser les jeux fonctionnels autour des colis nécessaires à leur mise en place et leur retrait ; la dernière nappe de colis est au même niveau que le pont, ce qui permet d'avoir un faible jeu au-dessus des piles de colis.

Enfin, le pont stockeur permet la mise en place des blocs de radioprotection en béton au plus près du mur de radioprotection en entrée de la partie utile de l'alvéole.

En fonction des colis de stockage à stocker dans un alvéole et de leur agencement dans l'alvéole, le pont stockeur est configuré spécifiquement. Les principales caractéristiques du pont stockeur sont la largeur de voie, la hauteur du mât, le système de préhension des colis ou des blocs de radioprotection (fourches, pinces, palonniers).

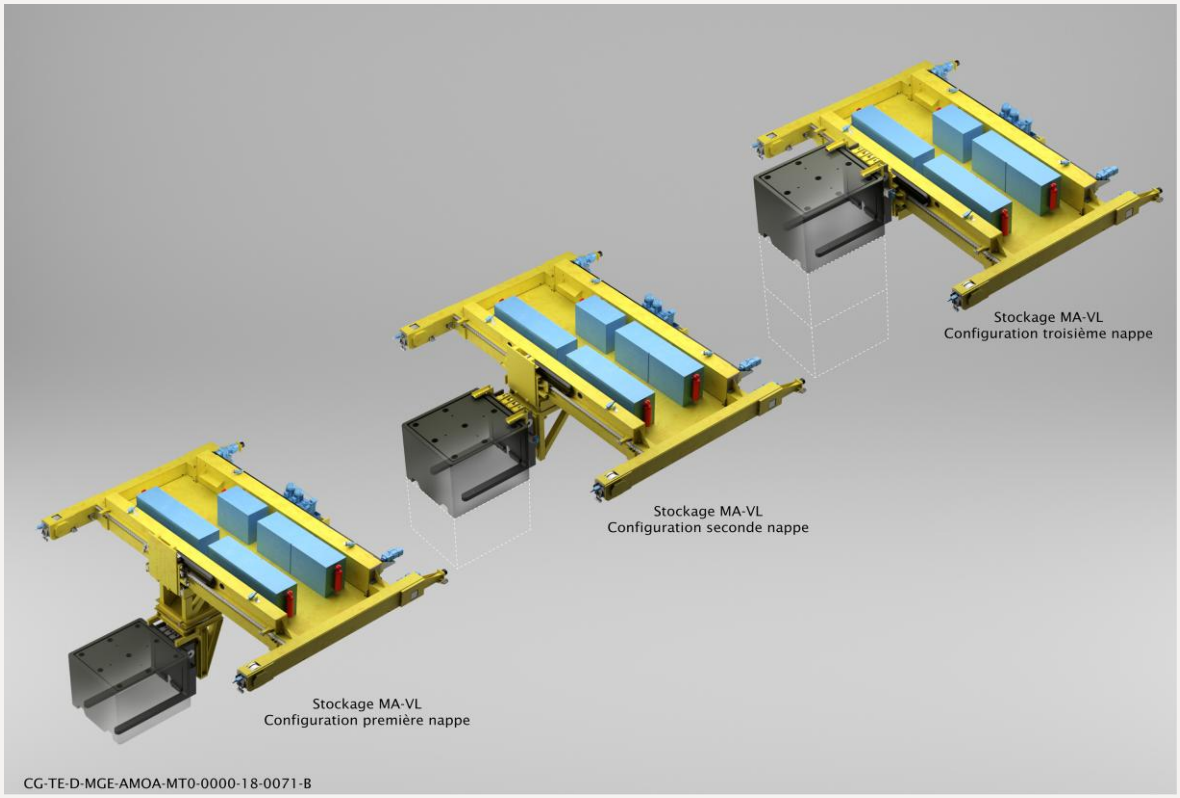


Figure 2-26 *Illustrations des configurations du pont stockeur pour les différentes nappes de stockage de colis en conteneurs de stockage ou en paniers*

Un banc d'essai réalisé en surface et composé principalement d'un pont stockeur, d'une charpente permettant le roulement du pont ainsi que de robots d'inspection (état des colis et des piles, ainsi que les rails de roulement et les parois visibles de l'alvéole) et d'intervention (nettoyage réparation des rails, dégagement des voies de roulement, nettoyage des frotteurs d'alimentation électrique du pont) (cf. Figure 2-27), permettra de s'assurer de la constructibilité du pont stockeur, ainsi que :

- de confirmer la précision de positionnement des colis (pose et empilage de colis de stockage) et de définir le domaine de fonctionnement du pont sur ces rails (définition des défauts maximum acceptables) ;
- de faire des essais sur les robots d'inspection et d'intervention.

Le process nucléaire des alvéoles MA-VL est en interface avec le génie civil de l'alvéole. Les essais, réalisés dans le cadre de l'expérimentation OMA au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ont en particulier pour but de quantifier les tolérances de réalisation et les déformations du génie civil secondaire d'un alvéole qui sert de support aux équipements du process nucléaire. Les résultats de l'expérimentation OMA permettront une mise à jour si nécessaire de la conception du process nucléaire avant sa réalisation, ainsi qu'une consolidation des domaines de fonctionnement des essais menés sur le pont stockeur (cf. Chapitre 2.7.2.1 du présent document).

Figure 2-27 Photographie du banc d'essai du pont stockeur – Vue générale

2.5.5 Le robot bride et de mesures

Lors de la mise en place des colis HA dans leur alvéole, afin de s'assurer des conditions géométriques internes de l'alvéole permettant la mise en place du colis, des robots ont été développés afin de contrôler l'état général du chemisage (cf. Encadré ci-dessous).

Les fonctionnalités du robot bride et de mesures sont classiques. En particulier, les fonctionnalités spécifiées pour l'aspect mesures du robot bride et de mesures sont disponibles avec du matériel du commerce issu de l'examen des pipelines des exploitations pétrolières et gazières. Ils peuvent être adaptés au besoin de contrôle de l'alvéole HA à réception des travaux et avant chargement des colis.

LE ROBOT BRIDE ET DE MESURES

Le robot bride et de mesures est un robot qui permet d'effectuer les opérations suivantes de (cf. Figure 2-28) :

- de dépose ou de mise en place de la bride qui obture la tête d'alvéole HA ;
- de contrôle dimensionnel et d'état général du chemisage.

Avant la mise en exploitation, ces vérifications ont pour but de caractériser dans le temps l'évolution du chemisage et donc de garantir la mise en place et le retrait des colis de stockage HA.

Le robot bride et de mesures permet également d'effectuer un suivi de l'évolution géométrique interne des alvéoles témoins du quartier pilote HA ce qui permettra par transposition d'évaluer l'évolution géométrique des alvéoles qui seront remplis.

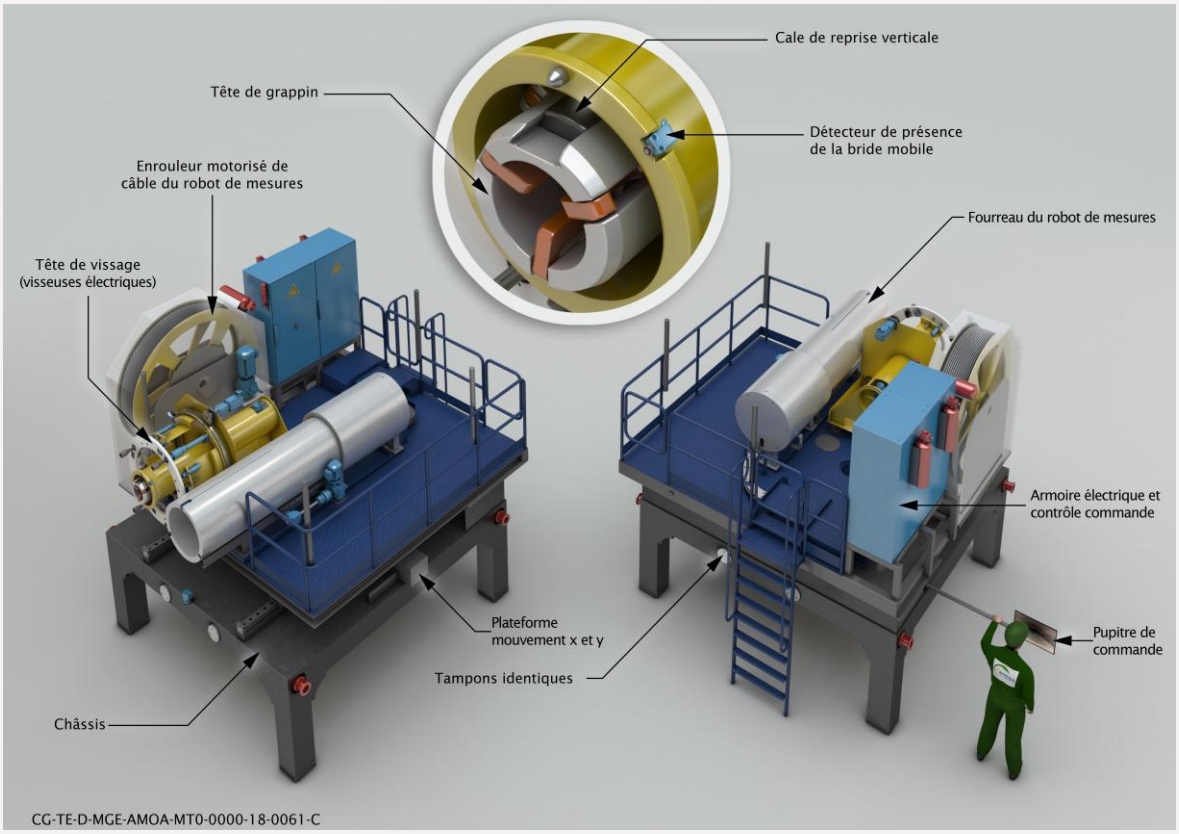


Figure 2-28 Illustration de l'ensemble robot bride et de mesures

Afin d'amener ces dispositifs de mesure *in situ*, l'Andra a développé un robot d'auscultation et d'inspection SAM (Système d'Auscultation Mobile) des alvéoles HA vides qui est un système mobile léger. Il peut être utilisé à la réception des alvéoles après leur réalisation et avant la mise en place d'un premier colis (cf. Figure 2-29).

Le robot SAM permet avant tout de réaliser des mesures dimensionnelles très précises au moyen de trois capteurs lasers dont la résolution de mesure est de 6 µm. Ces mesures dans un alvéole permettent de contrôler avec précision la circularité des chemises et d'en déduire au cours du temps la convergence de l'alvéole. Par conséquent, ces mesures permettent d'anticiper la dynamique des déformations. Avec des capteurs embarqués (caméras, barométrie, etc.) mais également un support pour fixer d'autres outils tels que des capteurs de gaz, ce robot complète son objectif d'inspection générale d'alvéole HA.

Déjà utilisé sur des essais d'alvéoles HA au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne depuis 2019, son amélioration se poursuit afin d'optimiser ses performances métrologiques, ses capacités d'adaptation pour être utilisé dans des alvéoles de différentes tailles et enfin, son autonomisation, c'est-à-dire le rendre le plus autonome possible dans la réalisation de ses mesures.

Figure 2-29 *Photographie du robot SAM pour les mesures de gaz dans l'essai d'alvéole HA AHA1605 au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

2.6 Le quartier pilote HA

2.6.1 Un outil clé du développement progressif du quartier de stockage HA

La phase industrielle pilote a pour objet de confirmer l'ensemble de la conception, du fonctionnement et de la démonstration de sûreté du stockage *in situ*. Elle permet à l'Andra :

- de valider, dans un environnement (industriel) réel, les modalités de conception des ouvrages souterrains au regard des caractéristiques de la roche ;
- de qualifier, de confirmer et de justifier progressivement le fonctionnement de l'installation nucléaire, sa sûreté, sa réversibilité et les modalités de sa surveillance.

Dans ce cadre, le quartier pilote HA a pour objectif d'apporter progressivement les éléments attendus en matière de stockage des colis HA pour préparer les prochaines échéances importantes de l'INB Cigéo, en conditions inactives avant son autorisation de mise en service puis en conditions actives :

- l'autorisation de mise en service de l'installation nucléaire pendant la phase industrielle pilote et la réception des premiers colis de déchets HA (notamment des colis de déchets HA0) ;
- la décision du Parlement sur les conditions de poursuite du stockage géologique sur la base du rapport de synthèse de la Phipil ;
- la décision d'engager la construction du quartier de stockage HA et la demande d'autorisation de mise en service associée (à l'horizon 2080) ;
- la décision de fermer le quartier pilote HA, en préparation de la fermeture du quartier de stockage HA et de la demande d'autorisation de fermer définitivement l'installation souterraine (à l'horizon 2150).

La conception, la construction, l'exploitation et la surveillance du quartier pilote HA sont ainsi organisées dans l'objectif de pouvoir progressivement avancer dans ce processus décisionnel (cf. Figure 2-30).

La conception des alvéoles HA proposée au stade du dépôt du dossier de demande d'autorisation de création pour le déploiement du quartier pilote HA (cf. Encadré ci-dessous) résulte des études de conception et de sûreté et des essais réalisés depuis plus d'une dizaine d'années au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, en premier lieu pour satisfaire les fonctions de sûreté après fermeture et en exploitation, ainsi que les fonctions de service liées à la réversibilité (40), et pour prendre en compte les acquis de connaissances scientifiques et technologiques issus des travaux menés sur cette période, que ce soit en termes de connaissances phénoménologiques ou de démonstration de mise en œuvre.

Figure 2-30 Illustration du quartier pilote HA

LES ALVÉOLES ÉQUIPÉS DU QUARTIER PILOTE HA

Les alvéoles du quartier pilote HA sont des ouvrages creusés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien, borgnes, faiblement inclinés montant et revêtus d'un chemisage en acier. Ils ont une longueur d'environ 80 m pour un diamètre utile de l'ordre 24 à 28 pouces (cf. Figure 2-31).

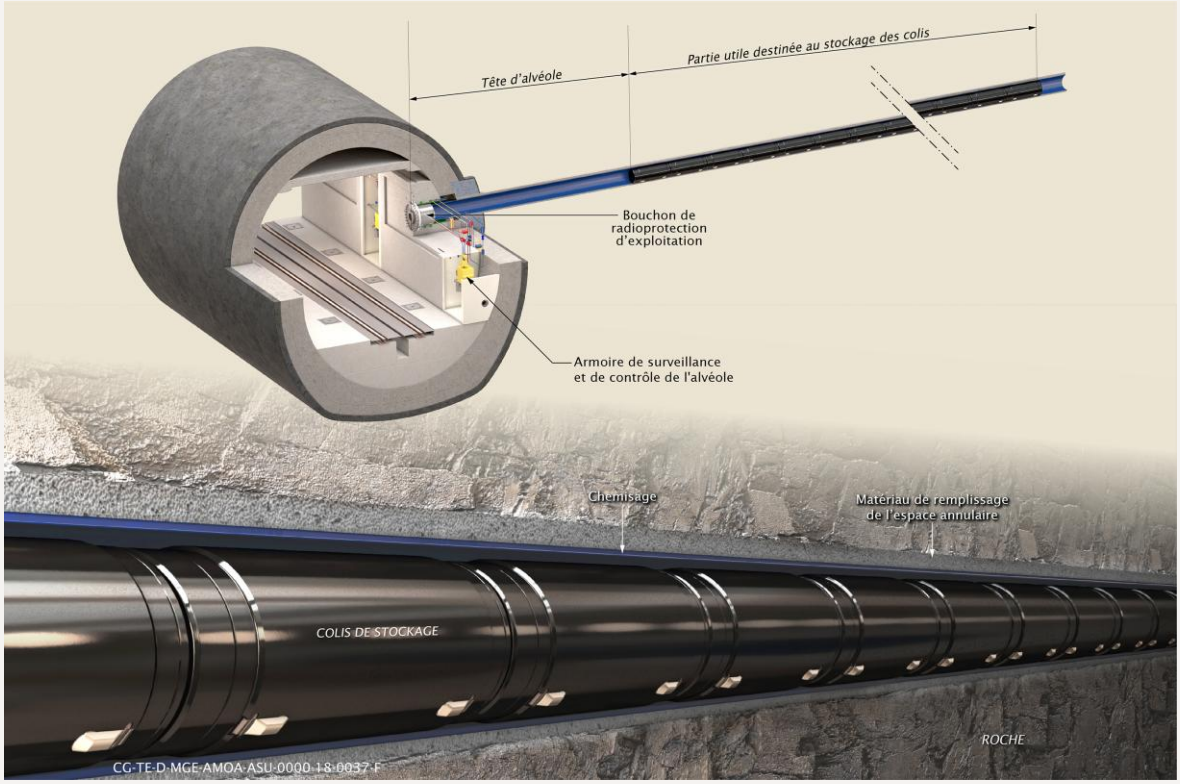


Figure 2-31 Vue générale illustrative d'un alvéole dans le quartier pilote HA et de sa galerie d'accès

L'alvéole HA comprend une partie utile, chemisée, destinée au stockage des colis de stockage HA et une tête d'alvéole intégrant les équipements d'exploitation et de fermeture de l'alvéole.

L'interface entre l'alvéole et la galerie d'accès est assurée par le massif d'accostage composé de la bride de fermeture et de la paroi d'accostage (cf. Figure 2-32).

La partie utile de l'alvéole est constituée d'un chemisage en acier permettant la mise en place des colis de stockage (et leur retrait éventuel) pendant la phase de fonctionnement et d'un matériau cimentaire de remplissage de l'espace annulaire (MREA) entre le chemisage et la roche.

Le quartier pilote contient des alvéoles de stockage[28] distribués en partie nord de la galerie d'accès.

[28] Le quartier pilote est dimensionné à ce stade pour contenir jusqu'à une vingtaine d'alvéoles de stockage, sans préjuger de développements ultérieurs intégrés dans le cadre du déploiement progressif du stockage.

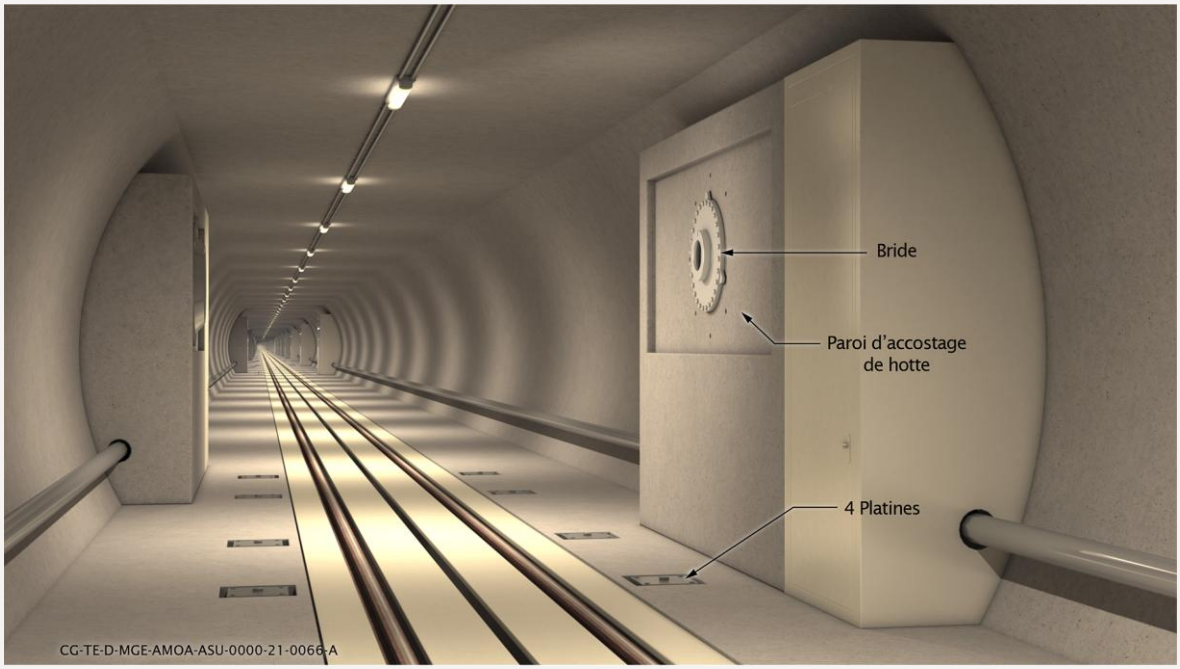


Figure 2-32 *Illustration du massif d'accostage d'un alvéole HA dans le quartier pilote HA*

Les actions relatives au quartier pilote HA ont ainsi pour principal objet d'apporter les éléments de confortation de la constructibilité et de qualification du fonctionnement de l'alvéole en vue de la mise en service du quartier (cf. Chapitre 2.6.2 du présent document).

Par ailleurs, les actions relatives au quartier pilote HA s'inscrivent en support à la confortation de leur conception et de leur dimensionnement au regard des éléments retenus dans les évaluations de sûreté, afin d'en préciser les marges ainsi que de poursuivre l'optimisation des dispositifs de surveillance des alvéoles (cf. Chapitre 2.6.3 du présent document).

Enfin, ces actions visent à poursuivre les développements technologiques permettant d'en optimiser la conception détaillée (cf. Chapitre 2.6.4 du présent document).

2.6.2 La démarche progressive support à la construction et à la qualification du fonctionnement de l'alvéole HA

La conception de l'alvéole HA dans le quartier pilote HA présentée dans le dossier de demande d'autorisation de création résulte d'itérations sûreté/conception/connaissances depuis plus de 20 ans intégrant progressivement la montée en maturité des connaissances scientifiques et technologiques. Cette conception permet de répondre aux différents enjeux de sûreté en exploitation et en après fermeture relatifs à ce type de colis de déchets (10).

De nombreux acquis ont été réalisés quant à la démonstration de la constructibilité des alvéoles HA, en particulier suite aux nombreux essais réalisés dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (cf. Encadré ci-dessous). Ainsi, l'Andra a acquis une bonne maîtrise du creusement des alvéoles ainsi que de la mise en place du chemisage et du MREA.

Dans la continuité de l'ensemble des actions menées jusqu'à ce jour, la confortation de la constructibilité et de la qualification du fonctionnement de l'alvéole HA dans les conditions industrielles attendues de l'installation nucléaire Cigéo se poursuit, en particulier au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Ces actions suivent une démarche progressive avec tout d'abord en amont de la phase de construction initiale la poursuite des études menées sur certains sous-composants de l'alvéole et en particulier sur la conception de la tête de l'alvéole au regard des fonctionnalités attendues (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document) et du système de prélèvement et de balayage de l'atmosphère interne de l'alvéole (cf. Chapitre 2.6.2.2 du présent document).

Suite à la consolidation progressive de la conception et du fonctionnement des différents composants de l'alvéole pris séparément, il s'agit ensuite d'intégrer ces acquis avec la réalisation de « prototypes » représentatifs d'un alvéole complet dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitre 2.6.2.3 du présent document).

LES APPORTS DU LABORATOIRE DE RECHERCHE SOUTERRAIN DE MEUSE/HAUTE-MARNE À LA CONSTRUCTIBILITÉ ET AU FONCTIONNEMENT DES ALVÉOLES ÉQUIPÉS DU QUARTIER PILOTE HA

La constructibilité des alvéoles HA fait l'objet d'un large programme expérimental engagé depuis 2009, conduit en parallèle des études d'avant-projet : 25 essais d'alvéole HA ont été réalisés à ce jour dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, dont 21 chemisés pour un linéaire cumulé supérieur à 1 000 mètres, selon une démarche progressive intégrant les évolutions et optimisations de conception, elles-mêmes nourries pour partie, par le retour d'expérience des essais (cf. Figure 2-33).

La faisabilité d'injection d'un matériau de remplissage à base de ciment entre le chemisage et la roche a également été vérifiée afin de garantir un bon remplissage du jeu à l'extrados du chemisage et améliorer l'homogénéité géométrique (limiter le nombre de zones de contact direct chemisage/roche qui ont été localement mises en évidence). Ainsi, 12 essais ont été injectés depuis 2016, soit environ 640 mètres linéaires cumulés et environ 170 m³ de MREA.

Figure 2-33 Tête de l'essai d'alvéole HA AHA1631 réalisé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne

Concernant la gestion de l'atmosphère interne dans l'alvéole, des essais de mise en place de système de prélèvement et de balayage ont également été testés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Par la suite, lors de la phase de construction initiale, les différentes activités support à la préparation du fonctionnement des alvéoles du quartier pilote HA concernant le développement progressif de leur réalisation, de leur conception à leur fonctionnement, sont menées dans le quartier pilote HA avec en particulier la réalisation d'un démonstrateur de constructibilité[29] (cf. Chapitre 2.6.2.3 du présent document) puis, suite à la construction des alvéoles courants, la réalisation des essais de fonctionnement en inactif de l'ensemble de leurs équipements (cf. Chapitre 2.6.2.4 du présent document).

2.6.2.1 La limitation des échanges gazeux et la tête d'alvéole HA

La réalisation des fonctions portées par l'alvéole HA au regard de la récupérabilité et du risque de formation d'une éventuelle atmosphère explosive ainsi que la réalisation des fonctions de sûreté portées par le conteneur de stockage au regard de sa durée de confinement s'appuient sur l'établissement et le maintien de conditions d'environnement en intrados de l'alvéole (*i.e.* composition de l'atmosphère et des eaux de resaturation) conduisant à l'établissement d'une corrosion généralisée maîtrisée et prévisible, notamment au regard de sa cinétique.

Concernant les conditions d'environnement gazeux au sein de l'alvéole, la conception de l'alvéole vise à limiter les venues d'oxygène depuis la galerie d'accès et permettre ainsi l'établissement des conditions internes de faibles teneurs en oxygène favorables à une corrosion généralisée dominante et des cinétiques de corrosion faibles (cf. Encadré ci-dessous).

Différents essais menés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ont mis en évidence, concernant le transfert des gaz entre la galerie d'accès et l'alvéole, (i) le rôle de la zone du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement au niveau de la tête des alvéoles comme voie de transfert potentiellement significative, (ii) le rôle des interfaces entre les différents composants de l'alvéole et (iii) la possibilité de minimiser ces transferts en colmatant ces voies de transfert.

LES ÉCHANGES GAZEUX ET LA TÊTE DE L'ALVÉOLE HA

Les échanges gazeux entre la galerie d'accès et l'intrados de l'alvéole HA s'effectuent suivant différentes voies, plus particulièrement les différentes interfaces entre les composants ouvragés de l'alvéole et la roche. En l'état actuel de sa conception, la performance de la tête d'alvéole, au regard de la limitation de l'entrée de l'oxygène venant de la galerie d'accès vers l'intrados du chemisage, repose (en partie ou en totalité) sur la performance passive de différents éléments, dont :

- le joint d'étanchéité torique métallique placé au niveau de la bride métallique boulonnée au niveau de la façade d'accostage (dispositif d'isolement entre l'alvéole et la galerie) ;
- la membrane d'étanchéité autour du massif d'accostage et du revêtement de la galerie (dispositif d'isolement au niveau de l'interface entre le massif d'accostage de la tête d'alvéole et le revêtement en béton de la galerie).

Par ailleurs, d'autres composants, par leur présence ou leurs caractéristiques intrinsèques, contribuent à limiter l'accessibilité de l'oxygène même s'ils n'en portent pas spécifiquement la fonctionnalité : c'est en particulier le cas par exemple du revêtement de galerie ou du matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) le long du chemisage.

En l'état actuel de la conception, l'acquisition d'éléments de démonstration de la constructibilité d'une tête d'alvéole présentant une performance vis-à-vis de la limitation des échanges gazeux significative concerne l'optimisation de la conception de la tête d'un alvéole HA prenant en compte les différents éléments participant à la limitation des échanges gazeux au niveau de la tête d'un alvéole HA (caractérisation et modélisation des échanges gazeux *via* les interfaces des différents composants de la tête, la zone endommagée et le matériau de remplissage). Cette étude sera prise en compte en tant que de besoin lors de la conception et de la réalisation de futurs « prototypes » au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitre 2.6.2.3 du présent document).

[29] Sans préjudice vis-à-vis de la possibilité d'envisager le déploiement de plusieurs démonstrateurs si le besoin en est exprimé par l'entreprise en charge de la réalisation.

2.6.2.2 Le système de prélèvement et de balayage de l'atmosphère interne d'un alvéole HA

La conception actuelle des alvéoles HA s'appuie sur une maîtrise des processus de corrosion du chemisage et des conteneurs de stockage, qui repose notamment sur une maîtrise de la composition de l'atmosphère interne de l'alvéole à une teneur en oxygène limitée (conditions quasi anoxiques) favorable à une faible cinétique de corrosion.

Ainsi, pendant l'exploitation de l'alvéole HA (mise en place des colis, etc.), le maintien d'une atmosphère interne favorable et sûre au regard de la sûreté en exploitation et de la préservation de la fonction de récupérabilité (portée par le chemisage) et dans la perspective de la performance en après fermeture (portée par le conteneur) est réalisée par des dispositifs de surveillance des gaz et la réalisation, en cas de besoin, d'un balayage à l'azote de cette atmosphère interne.

Ce système est également prévu lors d'actions de retrait des colis afin de prévenir tout risque de formation d'une atmosphère explosive en permettant de chasser l'hydrogène et éviter son mélange avec l'oxygène de la galerie au moment de la réouverture.

En complément des essais réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, la confortation de la conception et du fonctionnement du système de prélèvement et de balayage dans les alvéoles HA se décline au travers de la réalisation d'un banc d'essai en surface représentatif du fonctionnement d'un alvéole du quartier pilote HA.

Ce banc d'essai est constitué de tronçons de chemisage de géométrie similaire à ceux retenus dans la configuration actuelle. Il est équipé d'un système de balayage et de prélèvements de son atmosphère interne amovible, prenant en compte les contraintes en particulier géométriques de l'alvéole HA, d'un système de gestion des eaux d'exhaure ainsi que d'un système de contrôle commande permettant de réguler la composition de son atmosphère. Il permet également d'évaluer les effets de la température et de définir au juste besoin la répartition des différents piquages (nombre et positionnement).

En complément de ce banc d'essai, la poursuite du développement dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne d'essais d'alvéole HA apportera également des éléments de confortation sur la mise en place et le comportement du système de balayage.

2.6.2.3 Les éléments support à la confortation de la constructibilité et à la qualification du fonctionnement d'un alvéole HA équipé

À la suite de la confortation de la conception et du fonctionnement de la tête de l'alvéole HA et du système de prélèvement et de balayage, les études support à la confortation de la constructibilité et à la qualification du fonctionnement se déclinent en amont de la phase de construction initiale au travers de la réalisation au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne de « prototypes » de l'alvéole HA complet et équipé.

Ces « prototypes[30] » ont pour objet de montrer la faisabilité de construction et d'opérabilité d'un alvéole du quartier pilote inactif de 80 mètres de long représentatif d'un alvéole du quartier pilote HA, comprenant une tête d'alvéole équipée (massifs d'accostage et d'amorce en béton adaptés aux contraintes géométriques du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne), une bride et des dispositifs de surveillance et de balayage ainsi que de drainage des eaux d'exhaure. Ces « prototypes » permettront également de tester le comportement de l'alvéole sous sollicitation thermique (« prototypes » dits « alvéole HA de référence »).

[30] Les prototypes sont des ouvrages apportant des éléments complémentaires de démonstration de constructibilité et de fonctionnement d'ouvrages similaires de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo mais hors des conditions industrielles d'exploitation : ils sont réalisés en surface ou au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Un démonstrateur est un ouvrage dont l'objet est d'apporter les éléments complémentaires de démonstration de constructibilité et de fonctionnement d'ouvrages similaires de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo dans les conditions industrielles d'exploitation (cf. Chapitre 1.4.3 du présent document). Ces ouvrages sont ainsi réalisés dans l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo.

Ces « prototypes » prendront également en compte les optimisations de conception et/ou de fonctionnement étudiées d'ici la réalisation du quartier pilote HA (cf. Chapitre 2.6.4 du présent document) en fonction de leur avancement et des gains technico-économiques et de sûreté qu'elles apporteront.

La réalisation de ces « prototypes » sur des alvéoles équipés de plus en plus complets au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne permet de consolider la réalisation et le fonctionnement de cet alvéole dans des conditions très proches de celles attendues dans l'installation nucléaire Cigéo.

Cette démarche progressive se poursuivra au cours de la phase de construction initiale avec la réalisation d'*a minima* un démonstrateur de constructibilité *in situ* d'un alvéole dans le quartier pilote HA lui-même.

La réalisation de ce démonstrateur a plusieurs objectifs (41) dont :

- confirmer que les conditions de sécurité du chantier souterrain sont satisfaisantes ;
- contrôler les performances des procédés industriels de creusement en vraie grandeur et dans les conditions de mise en œuvre réelle de l'installation souterraine ;
- conforter *in situ* les modalités de conception et de construction au regard des caractéristiques du milieu géologique dans la zone d'implantation réelle de l'installation souterraine ;
- préparer les modalités de réalisation, d'exploitation et de surveillance des alvéoles industriels qui seront construits ensuite.

Ce(s) démonstrateur(s) sera(ont) réalisé(s) dans le quartier pilote HA (exemple d'un démonstrateur indiqué en ⑥ sur la figure 2-30). Il(s) sera(ont) équipé(s) des mêmes équipements que ceux nécessaires au fonctionnement et à la surveillance des alvéoles courants.

La réalisation de ce(s) démonstrateur(s) dans le quartier pilote HA suit l'ensemble des mêmes étapes de creusement, équipement, essais et qualification que les différents composants de l'installation nucléaire Cigéo (cf. Chapitre 1.4 du présent document).

2.6.2.4 Les essais de fonctionnement des alvéoles du quartier pilote HA équipés et de mise en place et de retrait des colis

Une fois acquis les éléments confortant la capacité à réaliser un alvéole équipé du quartier pilote HA après la qualification du fonctionnement des équipements du(es) démonstrateur(s), les autres alvéoles du quartier seront réalisés puis soumis aux étapes de recette et de qualification (cf. Chapitre 1.4 du présent document).

Par la suite, les essais de mise en stockage et de retrait de colis HA factices représentatifs des colis HA prévus d'être stockés dans ce quartier seront menés sur le(s) démonstrateur(s) puis les alvéoles courants (cf. Encadré ci-dessous). De façon classique, des sources radioactives seront utilisées pour vérifier la performance des équipements de protection contre les rayonnements.

LES ESSAIS TECHNOLOGIQUES DE MISE EN PLACE ET DE RETRAIT DES COLIS HA

Dans le cadre du projet européen ESDRED[31] (42), l'Andra a développé en 2008 un premier prototype de mise en place et de retrait des colis HA (cf. Figure 2-34).

CG-TE-D-MGE-AMOA-MT0-0000-20-0065-B

Figure 2-34 *Photographie du test de mise en place et de récupérabilité sur 100 mètres de longueur d'un colis HA dans un alvéole fortement déformé, à l'aide du « robot ESDRED »*

Les essais de ce prototype ont permis de simuler et de valider :

- la faisabilité de la mise en place des colis poussés unitairement ou conjointement (jusqu'à trois colis de masse unitaire égale à deux tonnes) sur une distance de 100 mètres ;
- la capacité du système à fonctionner (mise en place et retrait de colis HA) avec une déformation géométrique simulée du chemisage de l'alvéole sur la même distance, avec les défauts (situation hypothétique) suivants :
  - ✓ passage d'une marche entre deux tronçons (jusqu'à 10 mm) ;
  - ✓ désalignement entre les tronçons (forme en S).

Par la suite, une campagne d'essais spécifiques, sur banc en surface, à l'échelle 1, permettant de tester la capacité de récupérabilité (de retrait) des colis stockés en alvéole HA et de mesurer les efforts induits par cette opération, a été menée.

Un robot téléopéré de manutention conçu pour ces essais, capable d'évoluer dans des conditions d'environnement plus sévères, principalement en termes de présence de produits de corrosion, que celles attendues dans les alvéoles HA (paroxysme thermique, corrosion, vapeur d'eau saturée et eau de condensation s'écoulant sur la génératrice de l'intrados d'un chemisage non étanche) a été mis en œuvre (cf. Figure 2-35).

Ces essais ont permis de définir les efforts de traction nécessaires au retrait d'un colis. Ils ont également été source d'apprentissage et de retour d'expérience pour développer en avant-projet les dispositifs industriels de retrait susceptibles d'être mis en œuvre dans l'INB, en prenant en compte la question des motorisations électriques et des composants électroniques en température et dans une atmosphère potentiellement humide (conditions pénalisantes, en sus du rayonnement sur les composants.

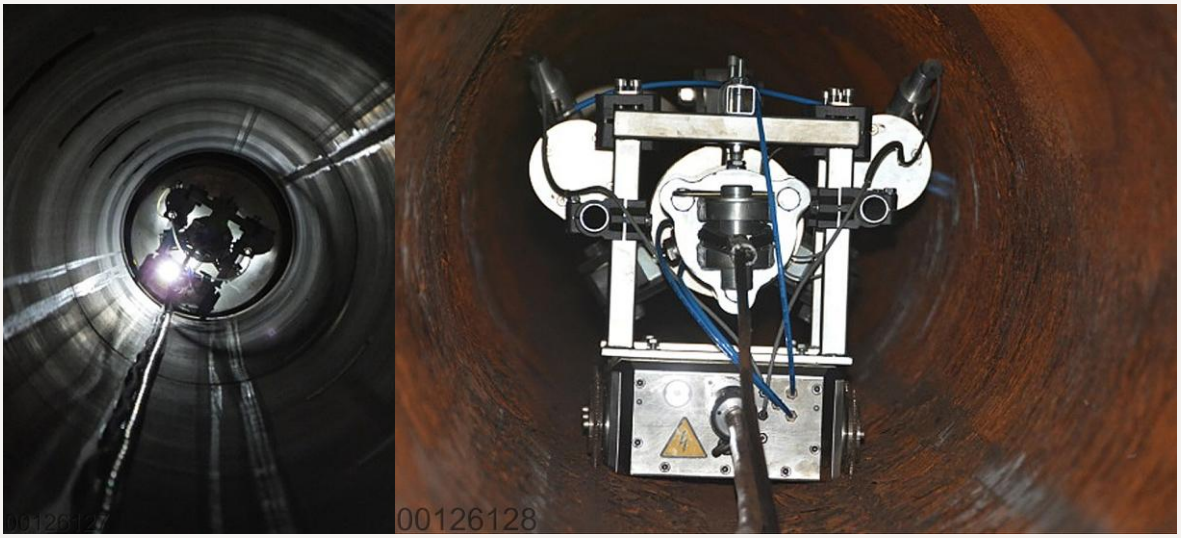


Figure 2-35 *Photographies du robot de retrait d'un colis de stockage HA en alvéole HA*

Deux types d'essais de mise en stockage et de retrait des colis seront en particulier examinés :

- le retrait d'exploitation d'un colis HA non contaminé remonté à la surface. Dans ce type d'essai, l'alvéole HA est en cours de chargement. Ce scénario comprend l'ensemble des opérations à mettre en œuvre pour le retrait d'un colis HA, non contaminé, jusqu'à sa mise en place dans un local d'entreposage tampon en surface. Ce scénario d'essai de retrait est d'abord conduit en inactif. Il sera répété en actif ;
- le retrait d'exploitation de colis HA non contaminés transférés dans un autre alvéole HA. L'alvéole HA est en cours d'exploitation et l'essai est réalisé en actif. Il comprend l'ensemble des opérations à mettre en œuvre dans le cadre du retrait de colis actifs d'un alvéole HA exploité pour transfert dans un autre alvéole HA parmi ceux déjà construits et vides. Cet autre alvéole peut être un ouvrage destiné à stocker des colis identiques à ceux retirés ou bien n'être utilisé que comme « disposition temporaire tampon », en attente de leur réorientation vers leur alvéole d'origine ou vers un autre ouvrage adapté à leur stockage.

Les dispositifs de surveillance et de gestion de l'atmosphère sont également testés lors de ces essais de récupérabilité (analyse des gaz, balayage de l'atmosphère interne de l'alvéole pour s'affranchir du risque de formation d'une atmosphère explosive (risque Atex) en préalable aux opérations de retrait en actif, comme ils l'auront été lors de la mise en stockage des colis. Lors des essais en actif, les dispositifs permettant de s'assurer de l'absence de radioactivité et les autres dispositifs de surveillance (robots, caméras, etc.) sont également testés.

[31] ESDRED : *Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs*

2.6.3 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances

En parallèle des différentes actions de confortation de constructibilité des alvéoles et de qualification de leur fonctionnement, différentes actions se poursuivent dans le cadre de l'amélioration continue des connaissances permettant en particulier de préciser les marges retenues dans les évaluations de sûreté. Ces études concernent en particulier l'amélioration des connaissances sur :

- le comportement des matériaux dans les conditions du stockage (i.e. processus de corrosion (cf. Chapitre 2.6.3.1 du présent document), comportement mécanique du chemisage et du conteneur (cf. Chapitre 2.6.3.2 du présent document) et comportement physico-chimique du matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) au contact du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.6.3.3 du présent document) ;
- le comportement thermique et thermo-hydro-mécanique du quartier pilote HA (cf. Chapitre 2.6.3.4 du présent document) ;
- les comportements des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les alvéoles du quartier pilote HA et dans le Callovo-Oxfordien en champ proche (*e.g.* plus particulièrement le comportement du sélénium, effets des conditions environnementales (température, état de dégradation des matériaux, etc.) (cf. Chapitre 2.6.3.5 du présent document) ;
- les dispositifs de surveillance et leur mise en place dans les conditions industrielles (cf. Chapitre 2.6.3.6 du présent document).

D'une façon générale, ces actions sont menées en amont de la phase de construction initiale au cours de laquelle sera construit le quartier pilote HA. Toutefois, elles peuvent être maintenues au cours de cette phase afin de poursuivre l'acquisition d'éléments de confortation des connaissances au regard de la maîtrise du comportement de ces ouvrages et des marges retenues dans les évaluations de sûreté.

2.6.3.1 Les processus de corrosion

Les processus de corrosion étant les principaux processus de dégradation des composants métalliques de l'alvéole HA, sa conception, son dimensionnement et son fonctionnement s'appuient sur la compréhension et la maîtrise des processus et des cinétiques de corrosion de ces composants métalliques dans les conditions d'environnement en intrados et extrados de l'alvéole (cf. Encadré ci-dessous).

Il s'agit de s'assurer que ces composants métalliques assurent leurs différentes fonctions de sûreté et de mise en place et de retrait des colis pendant la durée d'ordre séculaire de fonctionnement des ouvrages (*e.g.* épaisseur du chemisage au regard de sa tenue mécanique, épaisseur des conteneurs au regard de leur tenue mécanique et de leur confinement, étanchéité à l'eau, vis-à-vis du colis primaire, pendant la phase de fonctionnement et en après-fermeture jusqu'à ce que la radioactivité et, corrélativement, la température, ont suffisamment décru soit environ plusieurs centaines d'années, etc.).

Les cinétiques de corrosion en extrados du chemisage sont principalement pilotées par la chimie des eaux à son contact. Cette chimie des eaux est pilotée par l'état chimique du matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) et par la réactivité chimique de ce dernier avec les eaux des argilites oxydées de la zone de Callovo-Oxfordien endommagé au contact desquelles il est placé.

Les cinétiques de corrosion en intrados du chemisage sont, quant à elles, principalement pilotées par la composition gazeuse de l'atmosphère interne de l'alvéole et notamment sa teneur en oxygène.

LES PROCESSUS DE CORROSION DANS L'ALVÉOLE HA

La corrosion des aciers non alliés retenus pour le chemisage et les conteneurs des déchets HA fait l'objet de travaux de R&D depuis plus de 20 ans. Ils couvrent notamment plusieurs conditions physico-chimiques (température jusqu'à 100 °C, milieu poreux saturé d'eau, milieu non saturé d'eau, milieu atmosphérique avec des humidités relatives allant du sec à 100 %, conditions oxydantes à conditions anoxiques, rayonnement gamma, etc.) couvrant le domaine attendu des conditions d'environnement dans les alvéoles du quartier pilote HA.

Dans ces conditions d'environnement, l'ensemble des données expérimentales disponibles (essais en laboratoire jour et essais du chemisage et du conteneur de stockage HA) montrent que le processus de corrosion dominant est de type généralisé avec des cinétiques inférieures à 10 $\mu m.an^{-1}$:

- tant en intrados du fait des conditions proches de l'anoxie ;
- qu'en extrados du fait de l'ajout d'un matériau de remplissage cimentaire, entre le chemisage et la roche, qui permet de neutraliser l'acidité en paroi d'alvéole et favorise une formation plus rapide de produits de corrosion protecteurs, voire passivants.

De plus, certaines conditions n'ont pas montré d'influence significative sur le comportement des composants métalliques :

- les rayonnements gamma, pour des débits de dose jusqu'à 10 $Gy.h^{-1}$ pour lesquels sont dimensionnés les conteneurs de stockage HA, n'influencent pas le processus de corrosion dominant et les vitesses de corrosion généralisée ;
- la corrosion sous contrainte, grâce notamment au choix des nuances d'acier fortement ductiles et résistantes à la corrosion sous contrainte et à la fragilisation par l'hydrogène et au traitement thermique de détentionnement du conteneur de stockage HA après soudure de sa tête et de son corps, reste limitée à une zone superficielle écrouie ;
- les micro-organismes, présents dans les expérimentations, n'ont pas montré un rôle particulier sur les processus et les cinétiques de corrosion.

Les études relatives aux processus et cinétiques de corrosion ont pour objet de conforter les données retenues dans le dimensionnement des composants métalliques et dans les évaluations de sûreté sur les cinétiques de corrosion généralisée et sur la corrosion localisée du chemisage et des conteneurs de stockage HA en prenant en compte les paramètres environnementaux au sein des alvéoles (corrosion au contact du MREA, composition gazeuse de l'atmosphère, etc.) ainsi que les spécificités des concepts (soudures, etc.).

La maîtrise des différents processus de corrosion en extrados du chemisage s'appuie sur l'étude des effets de la formulation du MREA et de sa mise en place (cf. Chapitre 2.6.3.3 du présent document) en se focalisant sur les dernières formulations à haut pH et très faible teneur en soufre au travers :

- d'études en laboratoire jour et au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ;
- d'études des effets de l'homogénéité du MREA lors de sa mise en place en alvéole (contact ponctuel du chemisage avec des débris d'argilites, présence uniquement d'eau, présence mixte d'eau et contact, etc.).

La maîtrise des processus de corrosion en intrados du chemisage s'appuie quant à elle sur l'étude de la composition gazeuse de l'atmosphère au travers de l'étude expérimentale de l'influence de la teneur en oxygène, permettant d'identifier le rôle des faibles pressions partielles d'oxygène (échanges gazeux entre l'alvéole et la galerie) (conditions O_2 < 1 %).

2.6.3.2 Le comportement mécanique du chemisage

La compréhension et la maîtrise du comportement mécanique du chemisage (cf. Encadré ci-dessous) permettent de le dimensionner au regard de sa capacité à conserver des jeux de manutention suffisants sur la période de fonctionnement réversible et donc de l'estimation de sa durée de vie (résistance au flambement sous contact).

LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU CHEMISAGE

Les composants métalliques d'un alvéole HA seront soumis progressivement dans le temps, de manière conjointe, à la corrosion et à un chargement mécanique (directement par la roche pour le chemisage et indirectement par la roche *via* le chemisage pour le conteneur de stockage en après fermeture). Les données acquises dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, notamment avec les essais d'alvéole HA, permettent de bien appréhender le comportement mécanique de la roche (Callovo Oxfordien) et son interaction mécanique et hydromécanique avec un composant métallique du type chemisage.

Le chemisage est soumis dès sa mise en place à un chargement anisotrope par le Callovo Oxfordien, en lien avec l'anisotropie de la zone endommagée en champ proche créée par le creusement. Il en résulte une ovalisation qui s'accentue progressivement dans le temps avec le comportement différé de la roche endommagée en champ proche. Comme observé dans tous les ouvrages du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ce chargement suit rapidement (quelques années au maximum) un comportement asymptotique, avec une vitesse de convergence relative très faible, de sorte que cette ovalisation reste limitée durant la période de fonctionnement d'ordre séculaire.

À long terme (au-delà de quelques centaines d'années), avec l'accentuation progressive du chargement et la perte d'épaisseur progressive d'acier sain par corrosion, il est attendu un mode de ruine du chemisage par flambement radial. Du fait de la présence de la roche, qui apparaît comme un milieu confinant solide autour du chemisage, l'épaisseur critique de flambement est estimée entre 10 et 15 mm. En considérant la borne haute du domaine de vitesse de corrosion généralisée dans les conditions d'environnement d'un alvéole HA, soit 10 $\mu m.an^{-1}$, un flambement radial apparaît à partir d'environ 500 ans pour le corps de chemisage, soit bien au-delà de la phase de fonctionnement de l'installation.

Les études relatives au comportement mécanique du chemisage ont pour objet de conforter son modèle de comportement mécanique dans les conditions attendues en stockage et en particulier de prendre en compte de manière détaillée les effets du MREA. Ces études viennent conforter *in fine* la robustesse du modèle de comportement et concernent en particulier :

- le suivi de l'évolution mécanique du chemisage dans les ouvrages déjà réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ainsi que dans d'autres essais qui seront réalisés en lien avec les effets de la présence du MREA ;
- l'étude des effets des hétérogénéités (corrosion différenciée en différents endroits du chemisage, variabilité géométrique du chemisage, variabilité des caractéristiques mécaniques du milieu confinant, etc.) ;
- la mise en œuvre d'approches mécano-fiabilistes.

2.6.3.3 Le comportement du MREA

Le matériau de remplissage de l'espace annulaire de l'alvéole HA doit répondre à différentes fonctions tant au regard de la mise en place et du retrait des colis (*e.g.* corrosion du chemisage) que pour la sûreté en après fermeture (*i.e.* durée d'étanchéité du conteneur de stockage) (cf. Encadré ci-dessous).

Les travaux menés à ce jour ont étudié une gamme de formulations permettant de répondre à ces différentes fonctions, en particulier au regard de sa capacité à neutraliser l'acidité issue des argilites oxydées et à maîtriser les cinétiques de corrosion du chemisage à son contact pendant la phase d'exploitation. Dans le même temps, l'injection du matériau dans l'espace annulaire d'alvéoles HA au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (expérimentations AHA) démontre la faisabilité de sa mise en œuvre à grande échelle (plusieurs centaines de m^3).

Par ailleurs, les études de caractérisation physico-chimique permettent de disposer d'un premier jeu de données sur le comportement intrinsèque du matériau et son évolution chimique dans le temps en conditions de stockage et en interface avec les matériaux présents dans l'alvéole HA (*e.g.* neutralisation de l'acidité issue des argilites oxydées, ralentissement des vitesses de corrosion, neutralisation *in fine* par les eaux porales du Callovo-Oxfordien non oxydé).

LE MATERIAU DE REMPLISSAGE DE L'ESPACE ANNULAIRE (MREA)

Un matériau de remplissage de l'espace annulaire à base cimentaire (MREA) est injecté en extrados du chemisage pour limiter sa corrosion en :

- neutralisant le transitoire acide induit par l'oxydation des argilites en champ proche ;
- contribuant à limiter l'accessibilité de l'alvéole à l'oxygène provenant de la galerie d'accès.

Un domaine de formulation a ainsi été étudié sur la base des principales exigences suivantes :

- avoir une réserve alcaline suffisante pour neutraliser les espèces acides générées par les argilites de la zone endommagée oxydées lors du creusement, voire de l'exploitation de l'alvéole bien que la conception de l'alvéole HA vise à limiter les échanges gazeux avec la galerie d'accès ;
- être suffisamment ouvrable pour permettre un remplissage optimal du vide annulaire entre le chemisage et les argilites.

Le matériau retenu à ce stade est un matériau à pH basique élevé qui contribue ainsi à limiter les phénomènes de corrosion des éléments métalliques.

Les études concernant le MREA portent d'une part sur la confortation de sa formulation par la poursuite de l'acquisition de connaissances sur ses propriétés intrinsèques initiales ainsi que sur celles au cours de son évolution dans les conditions environnementales attendues dans l'installation de stockage (température, contact avec des argilites plus ou moins oxydées, etc.) et, d'autre part, sur la poursuite de la qualification de son comportement lors de sa mise en œuvre.

Concernant le domaine de composition du MREA, les études prévues concernent des optimisations relatives au comportement du matériau au regard de ses interactions avec les matériaux en interface (argilites partiellement oxydées, acier du chemisage, déchets vitrifiés). Ces études portent en particulier sur les expérimentations déjà engagées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et pourront s'appuyer également sur des prélèvements de matériau injecté dans des essais d'alvéole HA. Ces dernières priorisent les formulations à haut pH et à faible teneur en soufre.

Les propriétés de ce matériau (propriétés chimiques, mécaniques, hydro-dispersives, etc.) seront également caractérisées, tant pour leur état initial qu'au cours de leur évolution. Ces caractérisations s'appuieront sur une complémentarité entre les études réalisées en laboratoire jour et celles menées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Il s'agira également de conforter leur modèle d'évolution chimique.

Le développement du matériau intègre les questions des interactions du matériau avec le chemisage en acier (cf. Chapitre 2.6.3.1 du présent document) et avec les déchets vitrifiés (cf. Chapitre 3.1.2.1 du présent document).

2.6.3.4 Le comportement thermique et THM du quartier pilote HA

Le dimensionnement thermique et THM du quartier pilote HA retenu dans le dossier de demande d'autorisation de création vise à préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien des perturbations apportées par l'élévation transitoire de température dans le Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles HA et autour de ce quartier.

Du fait du processus d'acquisition continu des connaissances d'ici la construction du quartier, tant au regard des caractéristiques des argilites du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.1.5 du présent document) que des familles de colis de déchets HA destinées à y être stockées, les évaluations numériques ayant prévalues au dimensionnement thermique et THM du quartier pilote HA seront mises à jour, avant sa mise en service.

Par la suite, le suivi de l'évolution thermique et THM du quartier pilote mis en place dès sa réalisation permettra de conforter en situation réelle de fonctionnement et à l'échelle 1, les modèles et les valeurs de paramètres support à ce dimensionnement, déjà établis à plus petite échelle sur la base d'essais et de benchmarks (cf. Chapitre 3.3.2.1 du présent document).

En effet, lors de la phase industrielle pilote, le chargement de colis dans le quartier pilote HA permettra de suivre son évolution sur une durée de plusieurs dizaines d'années (*e.g.* évolution du champ thermique et de son anisotropie, des paroxysmes thermiques et du domaine de température atteint, du champ de contrainte et/ou du champ de pression interstitielle liée à la thermique dans le Callovo-Oxfordien, etc.). Ce suivi, réalisé au travers d'une surveillance de ces processus (température, pression d'eau dans le Callovo-Oxfordien, etc.), permettra de vérifier l'évolution du champ de températures au sein des alvéoles du quartier pilote HA (en fonction de leur chargement thermique), de conforter leur dimensionnement thermique ainsi que celui du quartier pilote HA et d'évaluer les marges disponibles.

2.6.3.5 Les comportements des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans le quartier pilote HA

Outre le comportement des matériaux des différents composants des alvéoles HA, l'acquisition continue de connaissances concerne le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les alvéoles du quartier pilote HA (cf. Encadré ci-dessous) (i) dans les conditions saturées ou non de ces ouvrages et (ii) lors des interactions avec les produits de dégradation des composants de ces alvéoles, au regard en particulier des paramètres caractérisant leur comportement dans les évaluations de sûreté (rétention, solubilité, etc.).

LE COMPORTEMENT DES RADIONUCLÉIDES ET DES SUBSTANCES TOXIQUES CHIMIQUES DANS LES ALVÉOLES HA

Les résultats expérimentaux montrent que certains éléments tels que les actinides ou les lanthanides (terres rares) sont fortement retenus dans la pellicule d'altération du verre et que le fait de considérer une congruence entre l'altération du verre (calée sur le relâchement du bore) et le relâchement des radionucléides constitue une approche conservative.

En situation de stockage, le relâchement des radionucléides par la dissolution du verre variera dans le temps avec la saturation en eau de l'alvéole :

- pendant la période non saturée, les radionucléides relâchés par l'hydratation du verre restent immobilisés au niveau du verre (et de l'alvéole de manière générale, seuls des phénomènes de condensation au sein des produits de corrosion au contact du verre pourraient conduire à la formation d'un film d'eau continu et au relâchement des radionucléides pendant cette période ;
- dès l'atteinte de la saturation totale de l'alvéole, la dissolution du verre entraîne la mise en solution possible de radionucléides : la grande majorité des radionucléides, notamment les actinides, sont immobilisés dans l'alvéole ou en champ proche de l'alvéole ; seuls les radionucléides mobiles à vie longue comme l'iode 129 peuvent migrer progressivement hors de l'alvéole dans le Callovo-Oxfordien.

La conception et les évaluations de sûreté, en particulier en après fermeture, pour le dossier de demande d'autorisation de création ont retenu des hypothèses prudentes sur le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans un alvéole HA.

Les études qui seront menées correspondent d'une part en une veille scientifique sur le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les milieux complexes tels que ceux des alvéoles de déchets HA (présence de produits de corrosion, température, etc.) et à leur prise en compte dans des modélisations numériques multi-couplages et, d'autre part, en l'acquisition de données complémentaires sur le comportement de radionucléides sensibles au redox, principalement le sélénium, dans les argilites du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages et dans le contexte de l'alvéole HA (incluant la présence de produits de corrosion et d'hydrogène). Dans ce cadre, des expérimentations en laboratoire jour (essais de solubilité, de sorption-réduction et de diffusion) et au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne sont envisagées (cf. Chapitre 2.1.5.1.5 du présent document).

2.6.3.6 La surveillance dans les alvéoles du quartier pilote HA

Que ce soit au regard de la sûreté en exploitation, de la sûreté en après fermeture ou pour garantir la récupérabilité des colis de déchets HA, l'Andra prévoit de mettre en place tant à l'échelle des alvéoles de stockage du quartier pilote HA qu'à celle du quartier pilote HA un certain nombre de dispositifs de surveillance.

Ces dispositifs ont pour objectif de surveiller l'évolution des composants du quartier, celle du Callovo-Oxfordien environnant ou bien celle des conditions d'environnement au regard des fonctions de sûreté qu'ils portent et/ou des performances qu'ils doivent garantir. Il s'agit ainsi pour ces dispositifs de permettre de s'assurer que ces composants évoluent tels qu'attendus en respectant leur domaine de fonctionnement.

Les études déjà menées sur les dispositifs de surveillance se sont appuyées sur des dispositifs déjà existants et adaptés aux conditions du quartier pilote HA, d'un alvéole HA et du Callovo-Oxfordien. Ces dispositifs ont notamment été mis en œuvre dans les essais menés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Les études complémentaires à mener sur les dispositifs de surveillance des alvéoles du quartier pilote HA portent sur les dispositifs « non standards » et innovants au regard des spécificités de l'installation nucléaire Cigéo.

Ils concernent par exemple la surveillance du comportement du chemisage (respectivement des conteneurs) vis-à-vis des fonctions de mise en place et de retrait des colis (respectivement du maintien du confinement sur la durée d'exploitation) au travers de la surveillance du comportement mécanique du chemisage et de leur corrosion (pour le chemisage et les conteneurs).

La conception des alvéoles du quartier pilote HA et la nature des processus nécessitant d'être surveillés au regard de la sûreté de l'installation nucléaire Cigéo ne permettent pas la mise en place de dispositifs de surveillance de tous ces processus au sein des alvéoles de stockage courant. Ainsi, l'Andra a fait le choix de réaliser dans le quartier pilote HA trois ouvrages inactifs, dits « alvéoles témoins » (cf. Figure 2-30), équipés de dispositifs permettant de surveiller l'évolution des alvéoles HA (cf. Encadré ci-dessous).

LES ALVÉOLES TÉMOINS

Les alvéoles témoins sont des ouvrages de conception identique aux ouvrages courants dont ils sont témoins et qui évoluent dans des conditions représentatives de celles dans lesquelles évoluent ces ouvrages courants au regard des processus qu'ils permettent de surveiller (*e.g.* même environnement thermique, etc.). Ainsi, leur fonctionnement et leur comportement sont représentatifs du fonctionnement et du comportement de ces ouvrages courants et pour la même phase de déploiement de l'installation nucléaire Cigéo. Ainsi, la surveillance du fonctionnement et du comportement de ces ouvrages « témoins » permettant d'en caractériser l'évolution est transposable à l'ensemble des ouvrages courants de même type.

Pour les dispositifs de surveillance prévus dans les alvéoles courants, l'alvéole témoin permet de vérifier la représentativité des suivis réalisés dans cet ouvrage par rapport à ceux réalisés dans les alvéoles courants et ainsi de pouvoir étendre les résultats issus de la surveillance du témoin aux alvéoles courants pour les processus non surveillés dans ces derniers.

Les trois alvéoles témoins du quartier pilote HA sont équipés des mêmes dispositifs de surveillance et de balayage de l'atmosphère, de suivi de la température et de suivi de la chimie des eaux d'exhaure que les alvéoles courants.

En outre, les alvéoles témoins sont équipés :

- alvéole témoin 1 : suivi de la déformation du chemisage (par exemple, par campagne de mesures tridimensionnelles) ;
- alvéole témoin 2 : suivi de la déformation du chemisage (par exemple par cannes de convergence) ;
- alvéole témoin 3 : suivi de la corrosion des aciers des conteneurs et du chemisage.

Ces suivis, mis en œuvre uniquement dans les alvéoles témoins, peuvent ainsi être étendus aux alvéoles courants.

Les études se poursuivent afin de conforter la conception, les modalités de mise en place et le fonctionnement des dispositifs de surveillance qui seront mis en place afin de surveiller le comportement de l'alvéole HA pendant son fonctionnement.

Les dispositifs de surveillance des processus phénoménologiques d'intérêt se développant dans le quartier pilote HA et leur mise en œuvre s'appuient sur plusieurs décennies de développements et d'utilisation dans de nombreux ouvrages, en particulier au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (*e.g.* le suivi du comportement mécanique des alvéoles) (cf. Encadré ci-dessous).

LES APPORTS DU LABORATOIRE DE RECHERCHE SOUTERRAIN DE MEUSE/HAUTE-MARNE À LA SURVEILLANCE DES ALVÉOLES ÉQUIPÉS DU QUARTIER PILOTE HA : LES FIBRES OPTIQUES

Depuis 2016, cinq essais d'alvéole HA réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ont été équipés d'une instrumentation non intrusive en extrados du chemisage selon une démarche progressive aussi bien vis-à-vis du nombre de capteurs mis en place que de la longueur instrumentée (essais d'alvéoles instrumentés sur 80 mètres).

Lors de la campagne 2017/2020, les câbles à fibre optique permettant le suivi du comportement thermomécanique du chemisage, ont fait l'objet de nombreux développements (cf. Figure 2-36).

Outre la mesure de température, les fibres optiques mises en place ont permis une mesure répartie :

- de la déformation axiale ; l'objectif étant de quantifier la mise en compression axiale du chemisage lors de la chauffe générée par les colis de déchets) ;
- de la déformation orthoradiale ; l'objectif étant de remonter, par méthode inverse, à l'ovalisation du chemisage du fait du chargement anisotrope par la roche et donc de s'assurer du maintien des jeux de manutention pour la mise en place et le retrait éventuel des colis de stockage pendant la période de fonctionnement.

La mesure répartie de température sur toute la longueur de l'ouvrage a aussi fourni quant à elle un indicateur quant à la présence de matériau de remplissage dans le vide annulaire au travers de la mesure de la variation de température lors de l'arrivée du MREA au contact du chemisage puis du fait de la réaction exothermique lors de la prise du ciment.

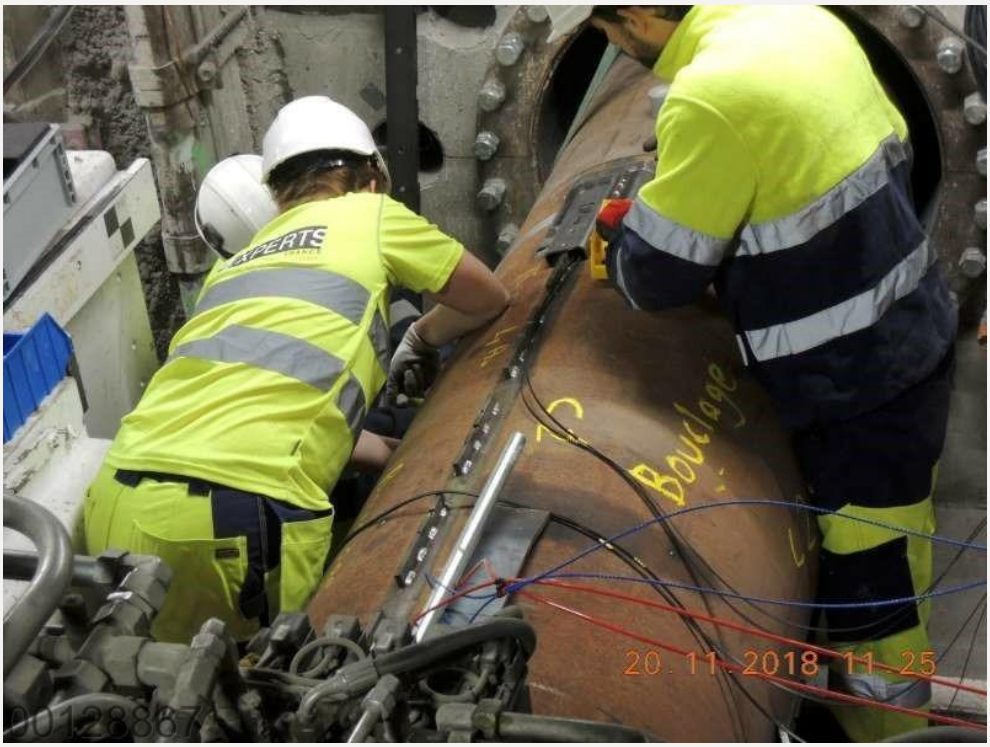


Figure 2-36 *Photographie de la pose de fibres optiques axiales dans l'essai d'alvéole HA AHA1605 réalisé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

Parmi les dispositifs à l'étude pour la surveillance non intrusive du comportement mécanique des alvéoles HA, il s'agit de conforter la mise en place et les modèles d'acquisition de données des fibres optiques dans les conditions d'exploitation des alvéoles.

Il s'agit également d'inter-comparer des données issues de plusieurs méthodes d'acquisition de données. Ces études s'appuient sur les données issues de l'instrumentation d'essais d'alvéole HA dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitre 2.6.2.3 du présent document).

Une autre partie de ces études a pour objet d'adapter des dispositifs existants aux conditions d'environnement des ouvrages (géométrie, température, rayonnement, encombrement, etc.), tel que :

- le développement et/ou l'optimisation des moyens de surveillance de la corrosion : méthodes électrochimiques, etc. ;
- le développement de moyens de mesures déportés et/ou miniaturisés : LIDAR[32] Raman, pH-mètre durable, etc. ;
- le développement de moyens d'auscultation mobiles.

Les actions de développement des dispositifs de surveillance prévus afin de caractériser puis de suivre l'évolution de la zone endommagée mécaniquement en champ proche des alvéoles sont décrites dans le chapitre 2.1.5.2 du présent document (méthodes acoustiques, etc.).

[32] LIDAR : Light Detection And Ranging

Les actions relatives au suivi du fonctionnement THM du quartier pilote ayant pour objet de conforter la démarche de dimensionnement de ce quartier afin d'optimiser celui retenu à ce stade pour le quartier de stockage HA sont détaillées dans le chapitre 2.6.3.4 du présent document.

2.6.4 L'intégration des avancées technologiques

Les études d'optimisation concernant d'une part la conception des alvéoles du quartier pilote HA et, d'autre part, leur fonctionnement se poursuivent afin de préparer la phase de construction initiale et la réalisation du quartier pilote HA.

Les actions concernent principalement les optimisations de la conception (cf. Chapitre 2.6.4.1 du présent document) et les optimisations du fonctionnement du quartier pilote HA et de ses alvéoles (cf. Chapitre 2.6.4.2 du présent document).

2.6.4.1 Les optimisations de conception

Les principales optimisations de conception étudiées concernent les performances d'étanchéité des alvéoles. Il s'agit en particulier d'optimisations de la conception de différents composants de l'alvéole :

- les jonctions des tronçons de chemisage : étude de procédés de soudage ;
- la zone endommagée mécaniquement au droit de la tête de l'alvéole : étude du court-circuit de cette zone à l'aide, par exemple, d'une purge des argilites endommagées et/ou la mise en place d'une saignée remplie d'un matériau gonflant.

Concernant l'optimisation relative au soudage des chemises du chemisage, des actions sont menées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne avec la mise en œuvre *in situ* à l'échelle 1 d'un test de soudage orbital des jonctions de chemisage (soudure pleine pénétration et pénétration partielle) (cf. Figure 2-37).

Figure 2-37 Photographie d'un essai de soudage orbital de tronçons de chemisage HA

2.6.4.2 Les optimisations de fonctionnement

Pour l'optimisation du fonctionnement de l'alvéole, les études concernent principalement la maîtrise de la composition de l'atmosphère interne des alvéoles avec le développement de systèmes passifs tel qu'un piège à hydrogène.

Concernant le chemisage, une des optimisations envisagées est la mise en place d'une protection cathodique afin d'en limiter la corrosion. Une évaluation de la faisabilité et des performances de cette protection cathodique par courant imposé est à l'étude en laboratoire jour.

2.7 Les quatre premiers alvéoles MA-VL

2.7.1 Une démarche adaptée à la mise en œuvre des quatre premiers alvéoles MA-VL équipés

Dans le cadre de la phase industrielle pilote et de façon similaire à la réalisation du quartier pilote HA (cf. Chapitre 2.6 du présent document), la réalisation de la tranche 1 du quartier de stockage MA-VL a pour objectif d'apporter les éléments attendus en matière de stockage des colis MA-VL pour préparer les prochaines échéances importantes de l'INB :

- l'autorisation de mise en service de l'installation nucléaire pendant la phase industrielle pilote ;
- la décision du Parlement sur les conditions de poursuite du stockage géologique sur la base du rapport de synthèse de la Phipil.

La démarche de l'Andra relative à l'étude des alvéoles de stockage des déchets MA-VL (cf. Encadré ci-dessous) résulte de plusieurs itérations de sûreté et de conception liées à l'acquisition progressive des connaissances scientifiques et technologiques relatives à l'ensemble des composants du stockage.

Les évolutions de connaissances qui ont orienté les choix de conception de l'alvéole MA-VL sont relatives aux colis MA-VL (caractéristiques, comportement dans le temps et chronique de stockage), aux propriétés de la couche de Callovo-Oxfordien (caractéristiques et comportement dans le temps) ainsi qu'aux principaux phénomènes thermique hydraulique mécanique chimique radiologique et gazeux (THMCRG). Ces évolutions ont été prises en compte en lien avec le développement de la conception du stockage (faisabilité, puis développement industriel) au travers des différentes boucles d'itération sûreté/conception/connaissances du projet.

La conception des alvéoles résulte des études de conception et de sûreté réalisées en phase d'avant-projet depuis 2011, en premier lieu pour satisfaire les fonctions de sûreté après fermeture et en exploitation, ainsi que les fonctions de service de stockage et de récupérabilité et pour prendre en compte les éléments de connaissances scientifiques et technologiques acquis jusqu'à ce jour.

LES ALVÉOLES ÉQUIPÉS DU QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL

Les alvéoles MA-VL sont des ouvrages de grand diamètre creusés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien. Un alvéole est une galerie d'axe quasi horizontal, d'un diamètre utile en partie utile de l'ordre de 8 m, orienté suivant la contrainte horizontale majeure (cf. Figure 2-38).

L'alvéole MA-VL est constitué d'une cellule de manutention des colis de stockage MA-VL, d'une partie utile de stockage et d'une jonction de retour d'air. La partie utile de stockage d'une longueur de plusieurs centaines de mètres à une géométrie adaptée à l'agencement des colis qui y sont stockés. Un alvéole en tant qu'ouvrage est constitué de deux grands types de composants :

- les génies civils primaire et secondaire. Le génie civil primaire est composé d'un système de revêtement, constitué de voussoirs en béton (en section courante) ou de béton coulé en place (reste du linéaire) avec un matériau compressible entre la roche et la structure en béton. Les aménagements internes en béton qui permettent d'adapter l'alvéole (radier, structures pour le pont stockeur, murs de séparation, etc.) aux besoins de la mise en stockage puis du stockage des colis de déchets MA-VL constituent le génie civil secondaire ;
- les équipements de manutention et d'exploitation de l'alvéole MA-VL. Ils permettent d'extraire le colis de stockage de la hotte de transfert (cf. process nucléaire cf. Chapitre 2.5 du présent document), de le transférer dans la cellule de manutention jusqu'au pont stockeur et de l'amener à sa position définitive de stockage en alvéole au moyen du pont stockeur.

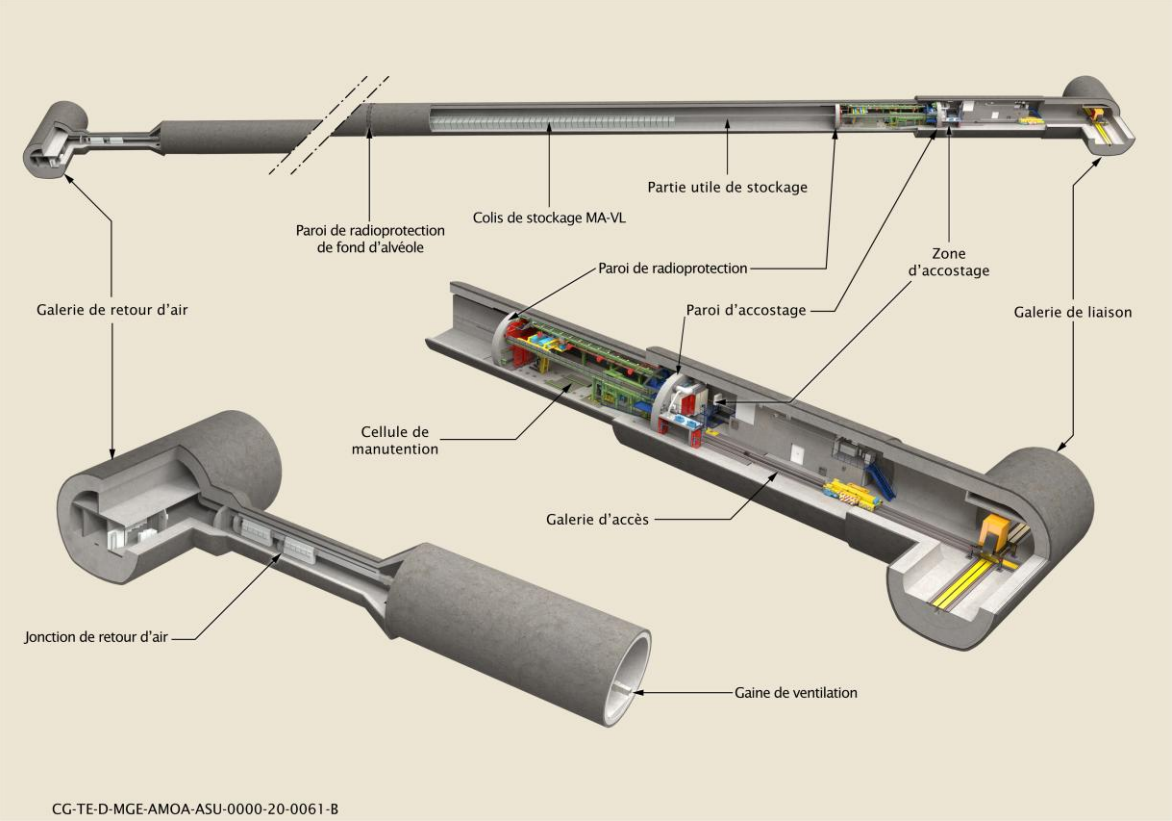


Figure 2-38 Vue générale illustrative d'un alvéole MA-VL et de sa galerie d'accès

La construction du quartier de stockage MA-VL se décompose en plusieurs tranches, dont la première est constituée de quatre alvéoles. Ces quatre premiers alvéoles sont les premiers alvéoles exploités en actif, c'est-à-dire avec des colis de déchets radioactifs exploités pendant la phase industrielle pilote.

Pour ces quatre premiers alvéoles, l'ensemble des éléments relatifs aux familles de déchets prévues d'y être mises en stockage (compositions, géométries, inventaires, etc.) sont connus (cf. Chapitre 1.4.60 du présent document). Les modes de mise en stockage, en conteneur ou par stockage direct, de ces familles sont également définis.

Il est à noter que le stockage des colis de déchets bitumés est prévu lors des tranches ultérieures du fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo. Ainsi, les éléments relatifs à ces alvéoles de déchets bitumés sont décrits plus loin, dans le chapitre 3.1.3 du présent document.

En cohérence avec le développement progressif et selon une démarche d'amélioration continue, les études relatives à ces quatre premiers alvéoles MA-VL se poursuivent en amont de la phase de construction initiale afin d'apporter des éléments de confortation de leur constructibilité (cf. Chapitre 2.7.2 du présent document).

Elles ont également pour objet d'apporter progressivement les éléments de qualification de leur fonctionnement en complément de ceux déjà acquis (cf. Chapitre 2.7.3 du présent document), en particulier concernant les éléments importants pour la protection (EIP).

Ces actions ont également pour objet de poursuivre une démarche d'acquisition continue des connaissances vis-à-vis, en particulier, du comportement phénoménologique des composants des alvéoles, du comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et des dispositifs de surveillance des alvéoles (cf. Chapitre 2.7.4 du présent document) au regard des éléments retenus dans les évaluations de sûreté et afin d'en préciser les marges ainsi que d'intégrer des développements technologiques permettant d'optimiser la conception présentée dans le dossier de demande d'autorisation de création (cf. Chapitre 2.7.5 du présent document).

2.7.2 La démarche progressive support à la construction des quatre premiers alvéoles MA-VL

La confortation de la faisabilité de la construction des alvéoles de déchets MA-VL se poursuit avec un développement par étapes avec tout d'abord la poursuite des études menées dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitre 2.7.2.1 du présent document) puis, lors de la phase de construction initiale, la réalisation d'un démonstrateur de constructibilité en entrée du quartier de stockage MA-VL (cf. Chapitre 2.7.2.2 du présent document).

2.7.2.1 Les apports du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne à la constructibilité des quatre premiers alvéoles MA-VL

La justification de la conception, du dimensionnement et de la constructibilité des alvéoles de déchets MA-VL porte principalement sur les questions relatives à leur tenue mécanique (cf. Encadré ci-dessous).

LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES OUVRAGES DE GRAND DIAMÈTRE

Les alvéoles MA-VL sont des ouvrages de grand diamètre creusés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien. La capacité technique de construction d'ouvrages de cette taille est apportée par le retour d'expérience national et international disponible dans le domaine des travaux souterrains.

Des progrès technologiques ont été réalisés dans ce domaine depuis une vingtaine d'années, en particulier avec le développement des méthodes de réalisation mécanisées, dont les tunneliers, et avec l'augmentation des besoins qui ont conduit à la construction d'ouvrages de diamètre de plus en plus important et sur des longueurs de plus en plus grandes.

En complément de ce retour d'expérience industriel, les activités de R&D menées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, associant la mise au point de méthodes de construction d'ouvrages représentatifs (différentes techniques) et les méthodes de caractérisation et d'observation scientifique requises pour en apprécier la phénoménologie (cf. Encadré au chapitre 2.4.2.1 du présent document) ont apporté un corpus important d'acquis de connaissances sur la mise en œuvre des différentes méthodes de construction d'ouvrages et leur impact sur l'endommagement de la roche ainsi que sur la phénoménologie du comportement mécanique et hydromécanique de la roche et des ouvrages.

Différents ouvrages d'un diamètre excavé proche des huit mètres à neuf mètres ont été réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne lors des précédents chantiers de creusement : chambres de montage et démontage du tunnelier à attaque ponctuelle en galerie GRD (orientation selon la contrainte horizontale majeure) et en galerie GVA (orientation selon la contrainte horizontale mineure). L'Andra dispose aujourd'hui d'un recul de plus de 15 ans sur les premières galeries du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et d'au moins cinq ans sur les dernières ayant les diamètres les plus importants.

Le retour d'expérience montre la bonne stabilité mécanique des galeries et la possibilité de transposer les méthodes constructives déployées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne à l'INB Cigéo, au travers notamment de la bonne compréhension des processus mécaniques mis en jeu, malgré la limitation des moyens logistiques disponibles au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (flux, ventilation, gabarit des machines, etc.) qui ne permet pas d'être en similitude exacte avec les ouvrages souterrains de l'INB.

Les observations associées au creusement des différentes galeries au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne montrent une fracturation similaire (typologie des fractures, organisation spatiale des fractures, structuration en deux zones suivant la connectivité et la typologie des fractures), quelles que soient les méthodes et les modalités de creusement testées jusqu'à présent et la géométrie des ouvrages (diamètre en particulier).

Comme la fracturation induite en champ proche d'un ouvrage lors du creusement conditionne son comportement, le comportement hydro-mécanique des ouvrages de grande taille réalisés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien est similaire à celui observé pour les ouvrages de plus petite taille (cinq mètres à six mètres de diamètre), sans l'identification de seuil rédhibitoire associé à l'augmentation progressive du diamètre excavé.

Les actions support à la confortation de la constructibilité des alvéoles MA-VL sont réalisées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne au travers, en particulier, de l'expérimentation Ouvrage MA-VL (OMA) (cf. Figure 2-39).

Figure 2-39 *Photographie de la demi-section supérieure excavée de l'expérimentation OMA réalisée dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

L'expérimentation OMA correspond à la réalisation d'un ouvrage de grand diamètre réalisé dans une galerie orientée selon la contrainte horizontale majeure et excavé sur une longueur de 80 mètres se rapprochant du concept des alvéoles MA-VL envisagé dans l'installation nucléaire Cigéo mais adapté aux contraintes opérationnelles du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (*e.g.* creusement en méthode traditionnelle en sections divisées au BRH, diamètre à une échelle réduite à environ 0,9/1).

Les essais réalisés dans cette expérimentation ont pour objectifs principaux de conforter :

- la faisabilité technologique et l'atteinte des performances attendues en termes de réalisation du creusement, de mise en place du revêtement et des matériaux compressibles (cf. Chapitre 2.4 du présent document) et de réalisation du génie civil secondaire avec des exigences spécifiques de réalisation propre à l'alvéole MA-VL ;
- la faisabilité de la surveillance du comportement mécanique du futur démonstrateur de constructibilité d'alvéole MA-VL (cf. Chapitre 2.7.4.3 du présent document). L'expérimentation OMA met en œuvre des dispositifs de surveillance comportant notamment des capteurs redondants, éprouvés ou innovants, dans la roche et le revêtement en béton coulé en place et permettra d'en comparer les performances et de s'assurer de leur bon fonctionnement dans la durée ;
- l'amélioration des connaissances sur le comportement hydromécanique de l'alvéole MA-VL, en particulier en confirmant l'influence limitée de l'effet de l'augmentation du diamètre sur le comportement de la roche et le rôle du matériau compressible sur la tenue mécanique du revêtement en béton de l'alvéole, en tenant compte de l'ajout du génie civil intérieur (secondaire) et la confirmation que le génie civil ne sera affecté que par de faibles déplacements et donc que la voie de roulement du pont restera compatible avec le domaine de fonctionnement du pont stockeur.

Le matériau compressible mis en place dans l'expérimentation OMA est choisi parmi les panneaux compressibles de l'expérimentation RTC, en fonction des résultats de cette dernière expérimentation (cf. Chapitre 2.4.2.1 du présent document).

En complément de la réalisation de l'expérimentation OMA, les différentes actions permettant d'apporter des éléments support à la confortation de la constructibilité de l'alvéole MA-VL se déclinent en des actions relatives à la confortation des modèles retenus dans le dimensionnement mécanique des ouvrages avec l'intégration progressive des acquis de connaissances. Les modèles utilisés évolueront ainsi vers des modèles plus opérationnels intégrant les résultats issus des données acquises au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne pour reproduire notamment le chargement anisotrope du terrain sur le revêtement.

2.7.2.2 Les apports du démonstrateur de constructibilité MA-VL dans l'installation souterraine de l'INB Cigéo

Dans le cadre de la démarche de développement progressif, les éléments de confortation de la constructibilité des alvéoles, issus en particulier de l'expérimentation OMA, seront complétés par la réalisation du premier ouvrage dans le quartier de stockage MA-VL correspondant à un démonstrateur de constructibilité de l'alvéole *in situ* et dans les conditions industrielles de l'installation. Ce démonstrateur de constructibilité est positionné en entrée du quartier de stockage MA-VL, côté sud (cf. Figure 2-40).

Ce démonstrateur a pour principal objectif de conforter la maîtrise de la construction des différents composants d'un alvéole MA-VL en lien avec les méthodes de creusement utilisées dans les conditions industrielles :

- au niveau des intersections :
  - ✓ entre la galerie de liaison et la galerie d'accès à l'alvéole ;
  - ✓ entre la galerie de retour d'air et la jonction de retour d'air.
- au niveau des zones de transition, entre la chambre de montage du tunnelier et le tronçon creusé au tunnelier et entre la partie utile et la jonction de retour d'air ;
- au niveau de la cellule de manutention et de la partie utile de l'alvéole creusées au tunnelier.

Il sera réalisé au tunnelier et permettra ainsi de valider la faisabilité *in situ* du montage et du démontage du tunnelier en alvéole MA-VL.

Les dimensions de cet ouvrage sont semblables à celles des quatre premiers alvéoles du quartier de stockage MA-VL. Il permet la mise en œuvre de différentes géométries de génie-civil intérieur selon ceux envisagés pour les alvéoles du quartier.

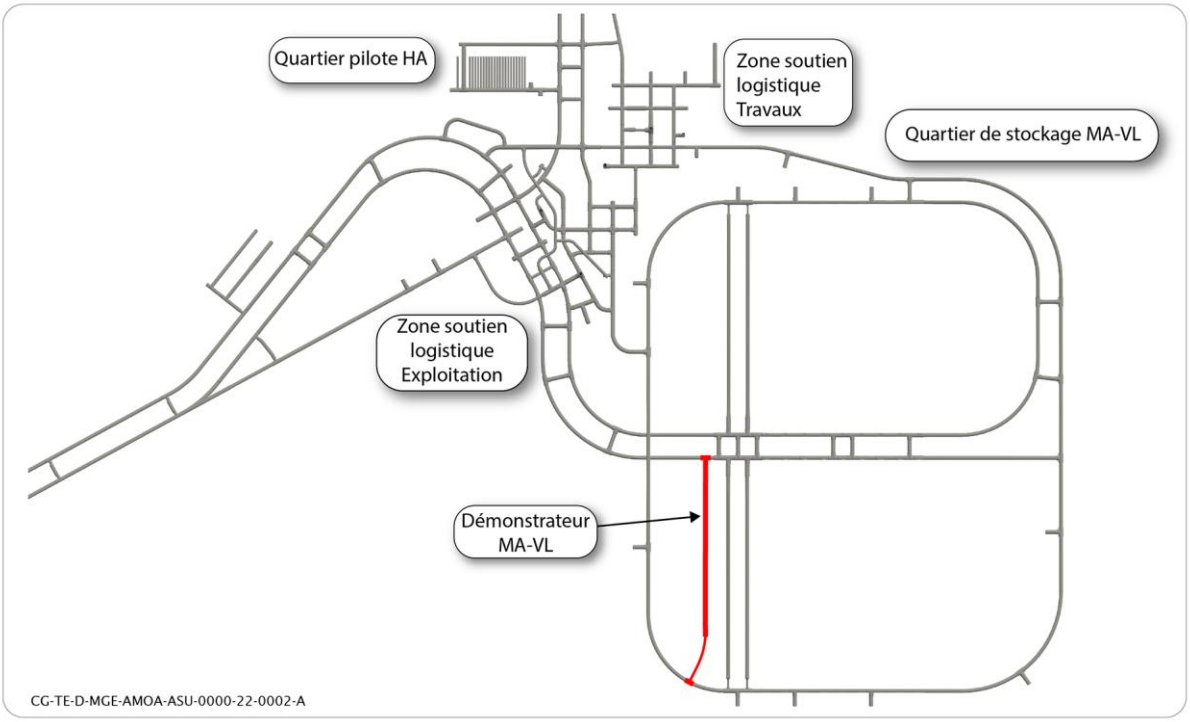


Figure 2-40 Localisation du démonstrateur de constructibilité MA-VL réalisé en tanche 1

Dans la continuité du fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo, le statut de cet ouvrage évolue de celui de démonstrateur de constructibilité vers celui d'un alvéole témoin (cf. Chapitre 2.7.4.4 du présent document).

2.7.3 La démarche progressive de qualification du fonctionnement des quatre premiers alvéoles MA-VL

En complément de la démarche progressive de confortation de la constructibilité des alvéoles MA-VL, il s'agit de poursuivre la mise en œuvre des éléments de qualification de son fonctionnement dans les conditions industrielles d'exploitation.

Cette démarche de qualification porte en particulier sur les composants présentant des spécificités par rapport à une installation nucléaire de base, en particulier au regard de leur mise en œuvre dans les conditions souterraines de l'installation de stockage Cigéo. Elle concerne également les éléments importants pour la protection (EIP) présents dans ce type d'ouvrage. Dans ce cadre, les principales actions concernent la qualification du fonctionnement du pont stockeur des colis MA-VL (cf. Chapitre 2.5.4 du présent document).

Cette démarche de qualification suit une démarche d'intégration progressive des différents composants d'un alvéole équipé jusqu'à aboutir à sa mise en service avec les essais de fonctionnement de l'ensemble de ses équipements.

En effet, une fois acquis les éléments confortant la capacité à réaliser un alvéole MA-VL après la qualification de la réalisation du démonstrateur de constructibilité MA-VL (cf. Chapitre 2.7.2.2 du présent document), de celle de la façade d'accostage (cf. Chapitre 2.5.3 du présent document) et de celle du pont stockeur (cf. Chapitre 2.5.4 du présent document), les quatre premiers alvéoles du quartier sont réalisés, équipés puis soumis aux essais de réception et de qualification de leur fonctionnement afin d'obtenir l'autorisation de mise en service en actif de l'alvéole et la réception des premiers colis MA-VL.

La réalisation de ces essais suit une démarche progressive (cf. Chapitre 1.4.5 du présent document) qui s'applique à l'ensemble des composants fixes et mobiles des alvéoles.

Ainsi, lors de leur réalisation, le génie civil primaire puis le génie civil secondaire de chacun des alvéoles MA-VL font l'objet de contrôles de conformité de leur réalisation (*e.g.* recette). Par la suite, après équipement (système de manutention, portes, filtres, etc.), chaque alvéole fait l'objet d'un contrôle de conformité de l'installation de ces équipements et de leur fonctionnement (pont stockeur, table de levage, contrôle-commande, etc.) avant recette.

Ensuite, l'exploitant procède à des essais de mise en place et de retrait de colis et à des vérifications des procédures d'exploitation (y compris les procédures de maintenance) dans des conditions inactives, avec des colis de stockage factices représentatifs des colis réels prévus dans ces quatre premiers alvéoles (*e.g.* essais de vérification du bon fonctionnement individuel et d'ensemble des équipements en situation normale et incidentelle de dimensionnement des systèmes de manutention, automatismes, etc.) (cf. Encadré ci-dessous). Des essais seront également menés avec des sources radioactives afin de qualifier les éléments de radioprotection. Les différents moyens de surveillance retenus pour les quatre premiers alvéoles sont également installés lors de la construction des ouvrages et testés avant la mise en service des alvéoles et la réception des premiers colis (cf. Chapitre 2.5.4 du présent document).

LES ESSAIS TECHNOLOGIQUES DE MISE EN PLACE ET DE RETRAIT DES COLIS MA-VL

Un programme d'essais de retrait de colis de stockage MA-VL a été mené en 2013 sur un banc d'essai en surface à l'échelle 1. Le retrait unitaire d'un colis de stockage a été réalisé par un dispositif spécifique de récupération : un système à fourches télescopiques et orientables, installé sur un chariot (cf. Figure 2-41).

CG-TE-D-MGE-AMOA-MT0-0000-20-0041-B

Figure 2-41 Photographie de l'essai de retrait d'un colis MA-VL désaxé sur sa pile

Les essais menés ont permis de vérifier la capacité du système à fourches à soulever et reprendre un colis de stockage MA-VL, en particulier en cas de déplacement de ce dernier hors de sa position nominale dans les positions des configurations de désalignement envisageables dans les alvéoles MA-VL, compte tenu de la géométrie du colis de stockage, de l'alvéole MA-VL et des jeux fonctionnels disponibles.

Concernant les essais de mise en stockage et de retrait des colis, deux cas seront en particulier examinés :

- le retrait d'exploitation d'un colis MA-VL non contaminé, remonté à la surface. Dans ce type d'essai, l'alvéole MA-VL est en cours de chargement. Le scénario comprend le test de l'ensemble des opérations à mettre en œuvre pour le retrait d'un colis MA-VL, non contaminé, jusqu'à sa mise en place dans un entreposage tampon en surface et l'extraction éventuelle des colis primaires MA-VL hors du conteneur. Ce scénario d'essai de retrait est d'abord conduit en inactif. Il sera répété en actif ;
- le retrait d'exploitation de colis MA-VL non contaminés transférés dans un autre alvéole MA-VL, sous réserve de la disponibilité de ce dernier. Cet autre alvéole peut être un ouvrage destiné à stocker des colis identiques à ceux retirés ou bien n'être utilisé que comme « disposition temporaire tampon », en attente de leur réorientation vers leur alvéole d'origine ou vers un autre ouvrage adapté à leur stockage.

  La réalisation de ce scénario dépend de la capacité de transfert et de mise en stockage des colis dans le quartier de stockage MA-VL, dans les configurations suivantes :
  - ✓ si le transfert est réalisé entre deux alvéoles desservis par la même galerie de liaison, le retrait d'un colis de stockage MA-VL du premier alvéole suivi de sa mise en place dans le second alvéole reste possible en restant dans l'installation souterraine ;
  - ✓ si le transfert est réalisé entre deux alvéoles desservis par des galeries de liaison différentes, le stockage est en revanche impossible en restant dans les galeries souterraines et requiert une remontée préalable en surface pour retourner la hotte sur son chariot.

Les dispositifs de surveillance (robots, caméras) sont également testés lors de ces essais de récupérabilité. Lors des essais en actif, les dispositifs de maîtrise de l'atmosphère sont également testés pour s'affranchir du risque Atex et s'assurer de l'absence de dissémination.

2.7.4 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances

En parallèle des différentes actions de confortation de constructibilité des alvéoles MA-VL et de qualification de leur fonctionnement, différentes actions se poursuivent dans le cadre de l'amélioration continue des connaissances permettant en particulier de préciser les marges retenues dans les évaluations de sûreté. Ces études concernent en particulier :

- l'amélioration des connaissances des différents processus phénoménologiques affectant les composants ouvragés des alvéoles MA-VL. Cela concerne en particulier le comportement chemo-mécanique des alvéoles après leur fermeture (cf. Chapitre 2.7.4.1 du présent document) et le comportement thermique des alvéoles contenant les déchets MA-VL les plus exothermiques pendant leur phase d'exploitation (cf. Chapitre 2.7.4.2 du présent document) ;
- le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les conditions des alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.7.4.3 du présent document) ;
- l'amélioration des dispositifs de surveillance et de leur mise en place dans les conditions industrielles (cf. Chapitre 2.7.4.4 du présent document).

D'une façon générale, ces actions sont menées en amont de la phase de construction initiale au cours de laquelle seront construits les quatre premiers alvéoles MA-VL. Toutefois, elles peuvent être maintenues au cours de cette phase afin de poursuivre l'acquisition d'éléments de confortation des connaissances au regard de la maîtrise du comportement de ces ouvrages et des marges retenues dans les évaluations de sûreté.

2.7.4.1 L'évolution chemo-mécanique des alvéoles MA-VL

Suite aux études menées sur le comportement des alvéoles MA-VL, l'évolution des processus mécaniques qui affecte les ouvrages sur la durée de la phase d'exploitation est maîtrisée : la fracturation du Callovo-Oxfordien induite par le creusement se développe très peu voire pas du tout au cours de la phase d'exploitation et les déformations différées du Callovo-Oxfordien (qui diminuent au cours du temps pour atteindre des vitesses faibles à la fin de la période d'exploitation) se traduisent par un chargement mécanique progressif du revêtement de l'alvéole par l'intermédiaire du matériau compressible.

Après la fermeture du stockage et jusqu'au long terme (plusieurs centaines de milliers d'années), les grands mécanismes/processus mis en jeu peuvent être définis avec robustesse. L'évolution mécanique des alvéoles MA-VL est marquée par leur chargement mécanique progressif par le Callovo-Oxfordien, avec une cinétique faible. Ce chargement finit par entraîner la rupture des revêtements/soutènements, de sorte que ce sont ensuite les piles de colis de stockage, qui sont chargés mécaniquement. Compte tenu de la limitation des vides résiduels initiaux dans les alvéoles et de l'absence de création de vide par la dégradation chimique des bétons, l'évolution mécanique des alvéoles n'entraîne pas une extension significative de la zone endommagée de Callovo-Oxfordien en champ proche. À (très) long terme, il y a un chargement mécanique global des alvéoles qui tend vers l'état de contraintes naturelles *in situ*.

Ainsi, les principales études, en cours et à venir, concernent la description détaillée dans le temps et l'espace du comportement du génie civil des alvéoles MA-VL après la fermeture des alvéoles et en particulier le comportement du béton armé vis-à-vis de sa durabilité, de l'évolution de ses performances et de ses propriétés physico-chimiques.

Ces études ont pour but de consolider les connaissances acquises sur les matériaux cimentaires et d'affiner les marges d'incertitudes des grands mécanismes et des processus gouvernant le comportement des bétons sur le court et le long terme. L'objectif est de disposer d'éléments scientifiques permettant de décrire le comportement des structures depuis leur mise en œuvre jusqu'au long terme afin de s'assurer de leur durabilité pour permettre la mise en place et le retrait des colis de stockage sur la durée définie pour l'exploitation et la réversibilité. Ces études s'appuieront en particulier sur l'ensemble des données acquises au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Les avancées de connaissances sur les composants ouvragés et le milieu géologique sont par la suite prises en compte de manière encore plus intégrée dans des modélisations numériques, en lien avec les progrès numériques et les couplages (temps/espace) avec la mécanique et les perturbations physico-chimiques, en support à une optimisation du dimensionnement des ouvrages et à une meilleure quantification des marges de sûreté des scénarios de sûreté. Il s'agit en particulier de conforter l'évaluation de la durée de stabilité des revêtements en fonction des sollicitations hydromécaniques et chimiques.

Des cycles réguliers de mise à jour de ces simulations seront effectués en lien avec (i) les avancées de connaissances, (ii) les avancées en termes de modélisations numériques et (iii) les avancées des outils numériques (solveurs, machines de calculs).

2.7.4.2 L'évolution thermique des alvéoles MA-VL

Les colis de stockage MA-VL présentent des puissances thermiques faibles. Cette puissance thermique issue des désintégrations nucléaires dans les déchets se manifeste par de la chaleur qui est dégagée dans l'alvéole. Lors de la phase de fonctionnement ventilée, cette chaleur est majoritairement évacuée par la ventilation. Une fois la ventilation arrêtée, la chaleur dégagée par les colis va se dissiper radialement vers le génie civil, le matériau compressible puis le milieu géologique.

Pour les alvéoles MA-VL destinés à stocker des colis de stockage présentant les puissances thermiques les plus fortes, la puissance thermique des colis sera limitée par la spécification d'acceptation des colis afin de garantir la durabilité des matériaux cimentaires ayant une fonction de confinement (par exemple pour le C1PG^{SP}) ou de tenue mécanique pour le génie civil de l'alvéole. Il s'agit en particulier des alvéoles de stockage des C1PG^{SP} et des CSD-C.

Dans ce cadre, la maîtrise de la conductivité thermique des composants de l'alvéole est nécessaire. En particulier, le développement du matériau compressible pour ses propriétés mécaniques (cf. Chapitres 2.4.2.1 et 2.4.2.2 du présent document) intégrera aussi une exigence sur une conductivité thermique minimale pour ces alvéoles.

De plus, afin de mieux préciser la caractérisation de la conductivité thermique des argilites du Callovo-Oxfordien et sa variabilité en champ proche des ouvrages, un essai *in situ* à l'échelle d'une galerie est prévu d'être réalisé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Par la suite, l'évolution thermique des alvéoles MA-VL de déchets faiblement exothermiques sera mise à jour régulièrement en lien avec les acquis continus de connaissances sur les propriétés des argilites du Callovo-Oxfordien réalisés lors de la reconnaissance à l'avancement menée pendant la phase de construction initiale (cf. Chapitre 2.1.5.1.3 du présent document). S'il y a lieu, une analyse des conséquences sur les spécifications d'acceptation sera faite (cf. Encadré du chapitre 1.4.6 du présent document).

2.7.4.3 Les comportements des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les alvéoles MA-VL

Outre le comportement phénoménologique des différents composants des alvéoles MA-VL, l'acquisition continue de connaissances concerne le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques (cf. Encadré ci-dessous) (i) dans les conditions cimentaires saturées ou non de ces ouvrages et (ii) lors des interactions avec les produits de dégradation des déchets MA-VL des familles prévues d'être stockées en tranche 1 (composés organiques, etc.).

Certains déchets MA-VL contiennent des composés organiques de nature diverse dont le comportement et leurs effets sur le comportement des radionucléides ont été évalués pour les matériaux cimentaires des alvéoles MA-VL en termes de solubilité/spéciation, rétention et diffusion. Ces effets sont similaires à ceux indiqués dans l'encadré au chapitre 2.2.2.3 du présent document).

Ainsi, la poursuite d'une démarche d'acquisition continue des connaissances au regard des effets des matériaux cimentaires et des produits organiques de dégradation relâchés par les colis de déchets MA-VL de la tranche 1 sur la migration (solubilité, rétention, diffusion) des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les argilites du Callovo-Oxfordien et dans les matériaux cimentaires en conditions non perturbées et sous l'effet des différentes perturbations (organiques, alcaline, etc.) participe à la caractérisation des marges retenues dans les évaluations de sûreté.

LE COMPORTEMENT DES RADIONUCLÉIDES ET DES SUBSTANCES TOXIQUES CHIMIQUES EN CONDITIONS CIMENTAIRES

Les connaissances acquises depuis plus de 20 ans par l'Andra et ses homologues, notamment dans le cadre de projets européens et internationaux, ont permis d'établir des données et modèles relatifs à la migration (solubilité, rétention, diffusion) des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les matériaux cimentaires constitutifs des composants des alvéoles MA-VL (conteneur primaire de certains colis de déchets MA-VL, conteneurs de stockage, génie civil) en conditions non perturbées et sous l'effet de différentes perturbations (température, organique, saline, alcaline, etc.).

En situation de stockage, du fait de leur déséquilibre chimique avec l'eau porale des argilites du Callovo-Oxfordien, les matériaux cimentaires évoluent chimiquement dans le temps suivant, schématiquement, quatre états de dégradation successifs (de sain à carbonaté) pour atteindre un équilibre avec les eaux du Callovo-Oxfordien. Les données acquises par l'Andra et ses homologues, et celles issues de la littérature ouverte, forment un socle solide de connaissances sur lequel s'appuie l'évaluation du comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques suivant ces différents états de dégradation, en termes de solubilité/spéciation, rétention et diffusion.

En termes de tendances, les actinides et les lanthanides présentent de faibles solubilités et une grande rétention alors que les alcalins et alcalino-terreux sont plus solubles et moins retenus par les matériaux cimentaires. Il n'y a pas de corrélation directe entre l'état de dégradation de ces matériaux et leur capacité de rétention : les capacités de rétention de certains radionucléides peuvent ainsi être plus importantes pour des états dégradés par rapport à des états sains, compte tenu du rôle prédominant de certaines phases minérales dans la rétention et de leur présence quel que soit l'état de dégradation des matériaux cimentaires (à l'exception de l'état carbonaté en équilibre avec les carbonates du milieu mais qui ne sera pleinement atteint qu'à très long terme). Certains paramètres de mise en œuvre comme le rapport eau/ciment ou la teneur en granulats sont des facteurs d'influence secondaires vis-à-vis des paramètres de rétention.

Les actions concernant le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques en présence de molécules organiques portent principalement sur :

- la mise en œuvre de la suite de l'expérimentation DRO (diffusion de radionucléides en présence de molécules organiques) au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ;
- la réalisation de simulations du transfert des radionucléides en présence des molécules organiques au sein de l'alvéole et du Callovo-Oxfordien en champ proche, de manière intégrée (prise en compte des effets de complexation différentielle entre différents radionucléides et les molécules organiques, effet de la biodégradation de molécules organiques, etc.), en lien avec le développement des outils de simulations multi-couplages et multi-composants.

Il s'agit de disposer d'une représentation de plus en plus fine des processus afin de conforter les connaissances relatives aux effets des produits de dégradation des déchets organiques et des interactions déchets/matrices ou déchets/conteneurs (des produits de dégradation hydrosolubles (petits acides), etc.) sur le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

Au travers de la consolidation des modèles et données sur les transferts des radionucléides et des substances toxiques chimiques à l'échelle de l'alvéole MA-VL, ces éléments participeront également à la confortation du dimensionnement du quartier de stockage MA-VL vis-à-vis des perturbations physico-chimiques (*e.g.* entre deux alvéoles adjacents).

En complément de ces différentes tâches, une veille est maintenue au regard en particulier de l'évolution éventuelle des formulations des matériaux cimentaires utilisés dans les alvéoles MA-VL du fait, par exemple, de l'évolution de filière d'approvisionnement et/ou de la réglementation, et de ses conséquences sur le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques (rétention, transfert, etc.).

2.7.4.4 La surveillance dans les quatre premiers alvéoles MA-VL et les apports de l'alvéole témoin MA-VL

Que ce soit au regard de la sûreté en exploitation, de la sûreté en après fermeture ou pour garantir la mise en place et la récupérabilité des colis de déchets MA-VL, l'Andra prévoit de mettre en place dans les quatre premiers alvéoles du quartier de stockage MA-VL et dès leur construction un certain nombre de dispositifs permettant de surveiller l'évolution des composants du quartier, du milieu géologique ou des conditions d'environnement au regard des fonctions de sûreté qu'ils portent et/ou des performances qu'ils doivent garantir (cf. Chapitre 1.4.7 du présent document).

2.7.4.4.1 Le rôle de l'alvéole témoin

Après avoir permis de démontrer la constructibilité des alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.7.2.2 du présent document), le statut du démonstrateur de constructibilité MA-VL évolue vers le statut d'un alvéole témoin, c'est-à-dire celui d'un ouvrage évoluant dans les mêmes conditions d'environnement et pour une même phase de déploiement qu'un alvéole courant.

Cet ouvrage non actif permet la surveillance de l'évolution d'un certain nombre de processus caractéristiques du comportement des différents alvéoles MA-VL et de leurs colis mais dont la surveillance dans ces derniers n'est pas possible du fait de difficultés d'accessibilité (milieu irradiant après la mise en place des colis de déchets).

Pour les dispositifs de surveillance prévus dans les alvéoles courants, l'alvéole témoin permet également de vérifier la représentativité des suivis réalisés dans cet ouvrage témoin par rapport à ceux réalisés dans les alvéoles courants afin, si nécessaire, de pouvoir conforter l'analyse du processus suivi dans les alvéoles de stockage à partir des corrélations entre les comportements observés dans le témoin et dans les alvéoles de stockage. Suite à la confortation de cette représentativité, cet ouvrage permettra de poursuivre la surveillance du comportement des alvéoles courants même s'il y a une perte des dispositifs de surveillance dans ces derniers.

Cet alvéole témoin, qui est accessible durant toute la durée de fonctionnement de l'installation, permet ainsi de vérifier (i) l'état initial de la zone endommagée mécaniquement en paroi de l'ouvrage et de suivre son évolution pendant la phase de fonctionnement du quartier de stockage MA-VL, (ii) le comportement hydromécanique du Callovo-Oxfordien environnant, (iii) le comportement mécanique des revêtements, de la voûte et du radier. Cet ouvrage permet également de suivre leur tenue dans le temps dans les conditions d'environnement du stockage.

Des colis de stockage témoins non actifs seront également placés dans cet ouvrage pour suivre l'évolution de leur comportement thermo-hydro-mécanique et chimique dans l'environnement d'un alvéole MA-VL.

2.7.4.4.2 La confortation de la mise en œuvre de la surveillance

Le choix des phénoménologies à surveiller et celui de la nature des dispositifs de surveillance mis en place s'appuient sur l'ensemble du corpus de connaissances acquis sur l'évolution phénoménologique de l'installation et sur son fonctionnement.

Les études relatives à la surveillance des quatre premiers alvéoles MA-VL ont pour objet de conforter la conception, la mise en place et le fonctionnement des dispositifs de surveillance dans les alvéoles MA-VL. Ces actions concernent en particulier la surveillance des processus et fonctions spécifiques de l'installation nucléaire Cigéo, en particulier le suivi du comportement mécanique de ces quatre premiers alvéoles.

Les dispositifs de surveillance de ce processus et leur mise en œuvre s'appuient sur plusieurs décennies de développements et d'utilisation dans de nombreux ouvrages (cf. Encadré du chapitre 2.4.4 du présent document).

En complément de ces nombreux acquis de connaissances, l'Andra met en place un certain nombre d'études afin de conforter la mise en œuvre des dispositifs de surveillance relatifs au suivi de la tenue mécanique des ouvrages de grand diamètre.

Une partie de ces actions est réalisée dans le cadre de l'expérimentation OMA (cf. Chapitre 2.7.2.1 du présent document). Ces dispositifs concernent (i) l'extension et les propriétés hydrauliques de la zone endommagée mécaniquement du Callovo-Oxfordien en paroi des ouvrages de grand diamètre, (ii) la géométrie de l'ouvrage et les jeux fonctionnels et (iii) les conditions d'ambiance de l'ouvrage (température, hygrométrie, etc.).

Cette expérimentation est en particulier conçue avec des sections instrumentées permettant de qualifier les systèmes de mesure de convergence (fondés sur des extensomètres à corde vibrante durables ou des fibres optiques par exemple). Cette expérimentation permet également d'évaluer l'impact de la mise en œuvre de ces dispositifs lors de la réalisation d'un ouvrage de grande dimension et, si besoin, d'améliorer ou d'adapter les méthodologies de pose. Elle permet de confirmer ou d'améliorer la localisation des capteurs permettant d'accéder à des mesures les plus représentatives possibles des phénomènes.

Cette expérimentation permet également de qualifier certains types de fibres optiques et d'améliorer le traitement des données pour remonter à la convergence de l'ouvrage.

Outre les processus d'évolution mécanique des quatre premiers alvéoles MA-VL, des études se poursuivent afin d'améliorer les modalités de suivi des conditions d'environnement dans les ouvrages. Ces études s'inscrivent également dans une démarche générale de développement de dispositifs de mesures déportées non/faiblement intrusifs et sont mises en œuvre dans la continuité de celles déjà réalisées ou en cours. Il s'agit par exemple de l'amélioration de l'utilisation du LIDAR de type Raman pour le suivi des concentrations en H_2 et O_2, de la température et de l'hygrométrie. La faisabilité de principe est déjà démontrée pour l'hydrogène et l'humidité relative. Les études envisagées portent sur la démonstration de faisabilité pour la mesure de l'oxygène et l'adaptation du système à l'environnement du stockage souterrain avec des premiers tests dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les résultats obtenus permettront d'apporter des éléments de qualification pour son éventuelle utilisation dans l'INB.

Par ailleurs, le développement des robots d'inspection dédiés à la surveillance des alvéoles MA-VL se poursuit. Ces robots permettent de mettre en œuvre une surveillance dans l'alvéole une fois que la dernière nappe de colis est mise en place et que le pont stockeur ne peut ainsi plus accéder à la partie utile de l'alvéole (cf. Figure 2-42).

En complément, des adaptations de capteurs existants seront étudiées pour permettre leur embarquement sur ces derniers, par exemple des scans ou télémètres. L'objectif étant de pouvoir vérifier la capacité à récupérer les colis en suivant les éventuels mouvements/déplacements des colis/piles de colis en complément des mesures de déformation et de déplacement du revêtement et du radier acquises, par exemple, par fibres optiques et extensomètres. Ces robots pourront également être équipés de capteurs de gaz adaptés pour ces supports.

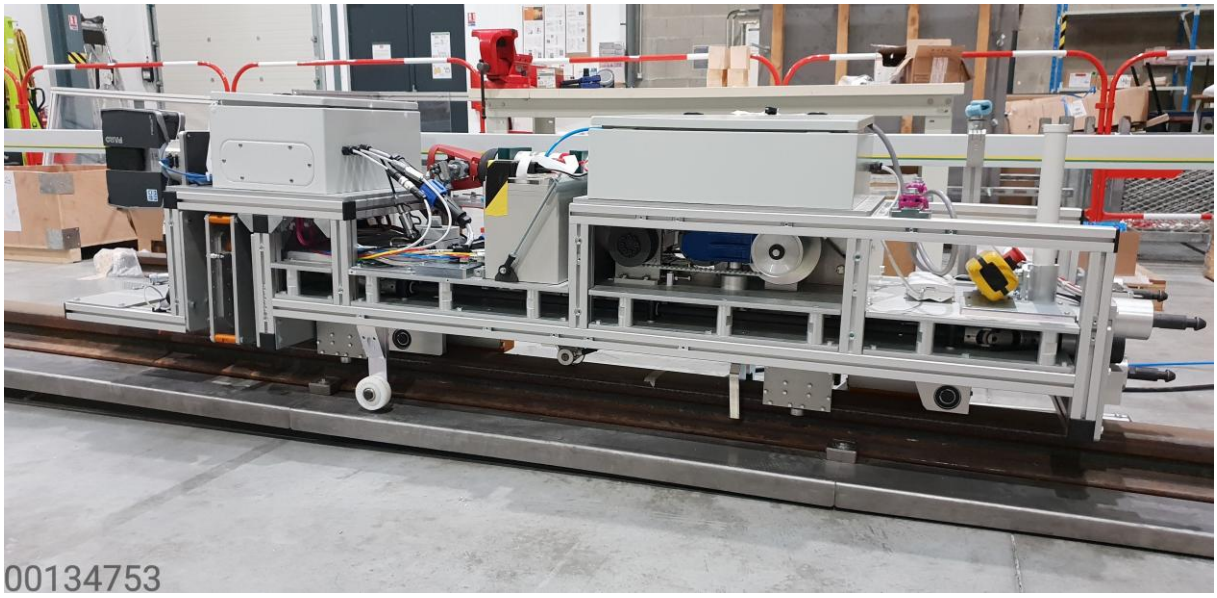


Figure 2-42 Photographie d'un exemple de robot d'inspection sur rail pour alvéole MA-VL

En parallèle des développements des dispositifs en tant que tels, l'amélioration de la surveillance des quatre premiers alvéoles MA-VL concerne celle des modélisations numériques de leur évolution. Elles portent en particulier sur l'évolution couplée de l'hydraulique-gaz, de la chimie et du transfert de solutés dans les alvéoles MA-VL avec la prise en compte dynamique (temps/espace) des effets des différentes perturbations chimiques couplées aux conditions non saturées et au transfert en solution.

2.7.5 L'intégration des avancées technologiques

En complément des actions détaillées ci-dessus, l'Andra poursuit une démarche de suivi des développements technologiques pouvant être réalisés sur des composants d'intérêt ainsi que de mise en œuvre de programme de développements dédiés.

Les avancées technologiques étudiées pour les quatre premiers alvéoles MA-VL concernent principalement leurs modalités de creusement. Actuellement, dans le cadre du dossier de demande de création, les alvéoles MA-VL sont réalisés au moyen d'un tunnelier à attaque ponctuelle (TAP). L'emploi de cette méthode répond à l'ensemble des exigences de fonctionnement, de sécurité, etc., attendues. Néanmoins, des études sont menées pour évaluer les apports de l'utilisation d'un tunnelier « pleine face » (ou *Tunnel Boring Machine* (TBM)) « démontable et/ou rétractable ». La possibilité d'utiliser un même tunnelier permettant d'adapter le diamètre des alvéoles sera également analysée. Cela pourrait permettre d'ajuster le volume de Callovo Oxfordien excavé et le volume de béton du génie civil de l'alvéole à la géométrie des colis stockés.

Une analyse a déjà été menée afin de comparer la pertinence de l'utilisation d'un TAP tel que prévu actuellement et d'un TBM au regard des contraintes des dimensions imposées par l'alvéole MA-VL (*e.g.* sur-excavation autorisée dans les chambres de montage assez faible, longueurs excavées assez courtes (environ 500 mètres sur les alvéoles), etc.). Cette étude montre que l'utilisation d'un TBM présente un certain nombre d'avantages (sécurité, cadences de creusement (environ cinq fois plus rapide), etc.) malgré des étapes de montage/démontage probablement moins aisées que pour un TAP.

Ainsi, un programme industriel sera mis en place afin d'apporter des éléments probants pour le développement industriel et technologique d'un concept de tunnelier aisément démontable avec manutention et translation de ses sous-ensembles.

2.8 Le système de stockage en grand

Dans le cadre de son avis sur le plan de développement des composants du projet de centre de stockage Cigéo (43), l'IRSN *« estime que la démarche présentée par l'Andra, qui quantifie la maturité technique des différents composants du projet Cigéo et planifie l'évolution de cette maturité, est intéressante dans son principe pour élaborer un indicateur interne à l'Andra de la progression industrielle du projet. Néanmoins, l'approche « composant par composant » adoptée pour élaborer le PDD [plan de développement des composant du projet Cigéo] ne permet pas d'apprécier le degré d'avancement de la démonstration de sûreté du projet dans son ensemble ni le caractère suffisant de celle-ci pour passer d'une étape clé de développement à une autre. Or un processus de décisions progressives qui, selon l'IRSN, doit impliquer diverses parties prenantes institutionnelles et publiques à chaque grande étape du projet, doit s'appuyer sur les éléments de démonstration des composants pris séparément mais aussi sur une telle vision d'ensemble qui renseigne sur le niveau de sûreté acquis et atteignable par la mise en œuvre de tous les composants. »*

En effet, outre les éléments relatifs à chacun des principaux composants de l'installation, la démonstration de l'obtention de la raisonnable assurance du fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo se doit de prendre également en compte les aspects de ce fonctionnement qui concernent sa globalité. Ainsi, ce chapitre a pour objet de décrire les actions ayant un impact sur plusieurs composants voire sur le système de stockage dans sa globalité (cf. Encadré ci-dessous).

LE SYSTÈME DE STOCKAGE

L'architecture de l'installation nucléaire Cigéo présentée dans le dossier de demande d'autorisation de création résulte d'une démarche d'itération sûreté/conception/ connaissances (cf. Chapitre 1.2 du présent document). Elle s'appuie notamment sur l'état de l'art des connaissances scientifiques et technologiques et les bonnes pratiques.

Parmi les principes retenus pour concevoir l'architecture et le fonctionnement de cette installation, il s'est agi de prendre en compte une minimisation des phénomènes pouvant intervenir dans l'évolution du stockage afin d'en faciliter leur compréhension et leur modélisation et ainsi de rendre robuste l'analyse de sûreté.

Notamment, (i) le principe de modularité du stockage (distance entre les différentes zones de stockage de déchets, entraxe entre les alvéoles, etc.), (ii) l'épaisseur et les propriétés intrinsèques de la couche hôte du Callovo-Oxfordien et (iii) la présence des scellements/bouchons, qui « ferment » hydrauliquement le stockage, ont pour conséquences de favoriser une évolution phénoménologique indépendante des quartiers de stockage les uns par rapport aux autres, de limiter les couplages de processus et ainsi de conduire à une organisation spatiale et temporelle de l'évolution phénoménologique du stockage bien maîtrisée.

Ainsi, les actions relatives aux processus phénoménologiques présentées dans le plan de développement de l'installation de stockage ne concernent en général qu'un composant.

D'autres types d'actions peuvent concerner plusieurs composants, comme par exemple les actions relatives au process nucléaire. D'autres encore peuvent concerner le système de stockage dans son ensemble du fait, par exemple, de l'échelle spatiale concernée par le processus phénoménologique pour lequel il s'agit d'apporter des éléments de confortation, ou bien de ses répercussions sur le fonctionnement d'ensemble de l'installation.

Au regard des spécificités de cette installation de stockage souterraine, les aspects concernant la globalité de l'installation sont les processus phénoménologiques se développant sur une échelle spatiale dépassant celle des quartiers de stockage : la tenue au séisme des différents ouvrages et des composants du process nucléaire souterrain (cf. Chapitre 2.8.1 du présent document) et le transitoire hydraulique-gaz en après fermeture (cf. Chapitre 2.8.2 du présent document).

Concernant le fonctionnement de l'installation, le principal point concerne le développement et l'amélioration des dispositifs de surveillance (cf. Chapitre 2.8.3 du présent document).

2.8.1 La tenue aux séismes des ouvrages, des composants du process nucléaire et du Callovo-Oxfordien

Bien que la région retenue pour l'implantation de l'INB Cigéo s'inscrive dans un contexte sismotectonique lui conférant un caractère quasiment asismique (cf. Encadré ci-dessous), les ouvrages souterrains (alvéoles, galeries, ZSL, puits et descenderies) et certaines installations de surface (bâtiment nucléaire de surface EP1, têtes de puits et têtes de descenderies des zones exploitation, etc.) doivent être dimensionnés pour résister au risque sismique pendant toute la période de fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo (cf. Encadrés ci-après).

LE SÉISME DE DIMENSIONNEMENT

Le secteur devant accueillir l'INB Cigéo se situe en partie orientale du Bassin parisien, l'une des zones géologiques les plus stables de la plate-forme ouest-européenne, à distance de toute influence même mineure de la poussée alpine. Ceci est corroboré par un taux de déformation nul à quasi nul, une activité sismique très faible, voire inexistante qui confère au Bassin parisien son caractère asismique, ainsi que par l'absence de tout indice néotectonique et de déformation récente sur les failles majeures et secondaires qui encadrent le secteur dans un rayon de plus de 30 km.

Afin de prévenir tout risque relatif à l'occurrence d'un séisme dans la région, un séisme de dimensionnement (SDD) pénalisant a été retenu pour le dimensionnement des installations présenté dans le dossier de demande d'autorisation de création. Il s'agit d'un spectre enveloppe par rapport au spectre SMS (séisme majoré de sécurité correspondant à un spectre forfaitaire prescrit dans le guide de sûreté de l'ASN (19) relatif au risque sismique et applicable aux installations nucléaires de base) et par rapport au SMF (spectre minimal forfaitaire défini de manière empirique par la RFS I.1.c du 31 mai 2001 (44)). Ce SDD est applicable au dimensionnement de l'installation (surface et souterraine) pour l'ensemble de la durée de la phase d'exploitation ; la période de retour de ce spectre étant de 10 000 ans.

Il convient de noter qu'aucune diminution de l'amplitude du séisme avec la profondeur n'a été prise en compte pour ce dimensionnement. Cette hypothèse est conservative, comme cela a pu être vérifié au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Un second spectre de réponse, dit SMPP (séisme maximum physiquement possible) a été également proposé pour la phase après fermeture de l'installation ; la période de retour de cet évènement étant de 100 000 ans.

L'amélioration des connaissances conduit à réinterroger régulièrement les hypothèses retenues pour la définition du spectre SMS, qui repose sur l'utilisation d'un zonage sismotectonique et sur une estimation des caractéristiques des séismes historiques.

LE COMPORTEMENT DU CALLOVO-OXFORDIEN EN RÉPONSE A UN SÉISME

Au regard de l'ensemble des travaux qui ont été menés depuis plus de 20 ans (sismique 2D et 3D, forages, expérimentations au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, etc.), aucune structure majeure à secondaire n'a été identifiée sur l'ensemble de la zone de transposition et, plus particulièrement, sur la ZIRA jusqu'à des profondeurs de 5 km à 6 km.

Cependant et en dépit de ce contexte géodynamique, sismotectonique et structural très peu à pas propice à pouvoir générer un séisme à l'aplomb de la zone de transposition et de la ZIRA, les conséquences de l'effet d'un séisme pouvant survenir après fermeture sur le stockage et sur le milieu géologique ont néanmoins été abordées. Dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo, des hypothèses ont été formulées, des simplifications ont été faites et des postulats ont été posés pour aborder et traiter de façon empirique et probabiliste les deux aspects d'un séisme qui sont l'aspect « vibratoire » et l'aspect « rupture ».

Le traitement de l'aspect « vibratoire » d'un séisme fournit un éclairage sur les paramètres plausibles associés à un éventuel séisme de type séisme maximum physiquement possible (SMPP) qui surviendrait à l'aplomb de la ZIRA et dont le foyer se situerait entre 5,5 km et 10 km de profondeur, en supposant qu'il existe une faille non-détectée sous la ZIRA. Ce scénario ne conduit ni à des ruptures en surface, ni en profondeur au niveau de la couche hôte du Callovo-Oxfordien.

Le traitement de l'aspect « rupture » par approche probabiliste (Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)), au travers du postulat qu'une discontinuité (a fortiori non détectée) affecterait la pile sédimentaire et serait capable de produire une rupture en surface, fournit un éclairage sur les caractéristiques de ce processus sismotectonique. On constate que le déplacement total prédit pour une période de retour cible fixée à 200 millions d'années est d'environ 15 cm en valeur médiane.

Afin de conforter la robustesse du choix du SDD retenu dans le dossier de demande de création, l'Andra prévoit un ensemble d'études complémentaires suivant une démarche en plusieurs étapes. En premier lieu il s'agira :

- d'analyser l'effet de la prise en compte de l'étude sur l'aléa sismique ainsi que de la méthode de propagation des incertitudes au niveau SMS, sur le niveau du SDD ;
- d'identifier les ouvrages et équipements les plus sensibles à une réévaluation du SDD ;
- de mener, à l'issue de ces analyses, une analyse de sensibilité du dimensionnement des ouvrages et des équipements à une augmentation du niveau du séisme de dimensionnement qui permettra d'identifier les marges de conception existantes et l'impact d'une révision de l'aléa sismique.

Dans un second temps, et sur la base de l'ensemble des études ci-dessus, l'Andra identifiera les éventuels besoins de renforcement de la conception et apportera les éléments de confortation sur les choix retenus au regard des enjeux de prise en compte des incertitudes sur l'aléa sismique et des résultats de l'analyse de sensibilité au dimensionnement des ouvrages et équipements.

Concernant la fonction de transfert du mouvement sismique entre la surface et la profondeur, l'étude de variabilité sera complétée sur la base des enregistrements déjà réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne aux profondeurs intermédiaires.

De plus, un outil de calcul des fonctions de transfert à l'échelle de toute l'installation souterraine, visant à évaluer l'accélération en fonction d'une sollicitation sismique sera développé, permettant notamment le passage du modèle géologique 3D à un modèle sismologique 3D.

Enfin, de nouvelles stations de mesures seront implantées à différentes profondeurs (niveaux -254 m, -445 mètres et -490 mètres) au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et en surface. La densification spatiale du réseau vélocimétrique au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne participera au développement d'un modèle calibré à des fins de la détermination de ces fonctions de transfert numérique (surface/profondeur) transposables à l'échelle de la zone d'implantation des ouvrages souterrains.

Ultérieurement, l'ensemble de ces travaux permettra de définir le plan d'installation du réseau sismique (densité, positionnement) dans l'installation souterraine de l'installation nucléaire Cigéo.

2.8.2 Des développements de solutions pour réduire la quantité d'acier dans l'ensemble de l'installation souterraine

Le transitoire hydraulique-gaz en après fermeture de l'installation souterraine est piloté par différents paramètres dont, en particulier, le terme source en hydrogène (cf. Chapitre 2.1.5.1.2 du présent document) à savoir la quantité d'acier présente dans l'installation souterraine principalement.

Ainsi, la réduction de la quantité d'acier dans l'installation souterraine en après fermeture est intrinsèquement de nature à diminuer la valeur de la pression maximale de gaz : au stade de la demande d'autorisation de création, la diminution de la pression maximale de gaz par rapport à la valeur de référence de 7,5 MPa serait de l'ordre de 1 à 1,5 MPa pour un domaine de réduction globale de la quantité d'acier de 20 % à 40 %. Par ailleurs, la réduction de la quantité d'acier contribuerait à limiter plus encore le domaine de sensibilité de la valeur de la pression maximale de gaz aux variations et incertitudes résiduelles de toutes natures.

Afin d'optimiser si besoin la maîtrise de la performance globale du système de stockage et dans le cadre de l'utilisation des meilleures techniques disponibles et de l'amélioration technico-économique, l'étude de solutions techniques de réduction de la quantité d'acier par substitution ou réduction *sensu stricto* sera poursuivie. Elle s'organise suivant deux axes :

- les « bétons armés »

  Cet axe concerne les bétons coulés en place (les radiers, des revêtements, le génie civil secondaire dans l'alvéole MA-VL) et les voussoirs préfabriqués. Il inclut le conteneur de stockage MA-VL (cf. Chapitre 3.1.3 du présent document).

  Les études s'inscrivent dans le cadre du déploiement de la tranche 1 de l'installation souterraine et celui des tranches ultérieures. Elles portent sur :

  - ✓ l'optimisation des dimensionnements, en intégrant le comportement différé du Callovo-Oxfordien, la tenue au séisme et la tenue sur une échelle de temps de fonctionnement au-delà de 150 ans jusqu'à 200 ans ;
  - ✓ la recherche de solutions alternatives, en rupture ou technologiquement avancées et utilisables/adaptables pour remplacer les armatures métalliques par des matériaux non réactifs ou diminuer la quantité d'armatures métalliques (renforcement non métallique ou mixte, optimisation du ferraillage) ;
  - ✓ la qualification des performances mécaniques et physico-chimiques des solutions étudiées et le développement de modèles de comportement mécanique et de durabilité associés ;
  - ✓ la validation des dimensionnements par la réalisation d'essais à échelle représentative et leur modélisation ;

- les conteneurs de stockage HA (cf. Chapitre 3.1.3 du présent document) et le chemisage des alvéoles HA (cf. Chapitre 3.3.3.2 du présent document). Ces études s'inscrivent dans le cadre du déploiement des tranches ultérieures à la tranche 1 de fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo.

2.8.3 L'amélioration continue des dispositifs de surveillance et de leur mise en œuvre

En support au fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo, l'Andra a développé une stratégie de surveillance de l'installation (cf. Chapitre 1.4.7 du présent document). Cette stratégie de surveillance se décline de façon opérationnelle dans les différents composants du stockage (*e.g.* Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.1.5.3 du présent document), le quartier pilote HA (cf. Chapitre 2.6.3.6 du présent document) ou les quatre premiers alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.7.4.4 du présent document)).

Une démarche générale est ainsi maintenue concernant l'amélioration des dispositifs de surveillance et de leur mise en place dans les différentes conditions d'environnement des ouvrages souterrains. Ces études concernent l'amélioration d'une part des dispositifs de mesures et, d'autre part, des outils et modèles numériques associés.

2.8.3.1 Les dispositifs de surveillance

Les principaux aspects des études d'amélioration des dispositifs de surveillance portent sur leur adaptation, les aspects de la transmission sans fil et des sources d'énergie. Elles incluent les matériaux constitutifs des capteurs ou des câbles d'alimentation et de transmission du signal en termes de durabilité.

L'adaptation de dispositifs et/ou la vérification de leur fonctionnement dans les conditions de température, de contraintes mécaniques, d'humidité relative, de présence de gaz ou de radiations ont permis de proposer un panel de dispositifs robustes utilisables dans les différents composants de l'INB. En s'appuyant sur ces résultats, il s'agit de conforter la qualification des systèmes complets d'acquisition des données dans des conditions représentatives des conditions d'environnement (radiations, humidités et gaz) dans les différents ouvrages.

En complément, les études se poursuivent sur le développement de modalités de surveillance embarquées, associées au développement de systèmes robotisés (par exemple cf. Chapitre 2.5.5 du présent document).

Par ailleurs, il s'agit également de conforter les méthodologies d'acquisition des données au regard par exemple des processus de déconvolution des données acquises par plusieurs types de dispositifs permettant de suivre l'évolution d'un même processus ou bien d'un dispositif permettant de suivre plusieurs processus, en lien avec l'optimisation de leur mise en œuvre dans les conditions industrielles.

2.8.3.2 Les outils numériques

La maîtrise des processus phénoménologiques se développant dans l'installation souterraine au cours de son fonctionnement repose à la fois sur une démarche d'expérimentations et de caractérisation des processus à différentes échelles et sur de nombreux travaux en simulations numériques. Depuis plus de 20 ans, le développement de méthodes et d'outils numériques performants, issus de nombreux travaux de recherche et capables de simuler sur le très long terme l'évolution du comportement du stockage et de son environnement naturel, avec une gestion permanente de l'accroissement du nombre de données et du détail des représentations a été mené.

Il s'agit ainsi de poursuivre l'amélioration de ces outils afin de disposer de méthodes numériques et de moyens de simulation encore plus performants permettant d'améliorer sur des systèmes de plus en plus intégrés et détaillés la représentation de la complexité des mécanismes mis en jeu, de leurs couplages et de la nature des milieux dans lesquels ils s'exercent (poreux, fracturés, ouverts).

Un important travail, déjà réalisé sur le développement de fonctionnalités physiques et numériques pour des codes existants, a conduit l'Andra à disposer d'un bouquet d'outils de simulations numériques (académiques et commerciaux) par grand processus physique et dans une logique de milieu poreux continu équivalent (*e.g.* comportement diphasique eau et multi-composants gaz, THM, transport réactif, hydraulique et transport de solutés en milieu poreux saturé). Ces outils ont ainsi permis l'évaluation temps-espace du comportement multi-physique, avec toutefois une prise en compte simplifiée de certains couplages (hydraulique non saturée, mécanique, etc.) par contraintes d'environnement et, du fait des limites des outils, par approche compartimentée ou à géométrie simplifiée.

Ainsi, dans le cadre de l'amélioration continue de ces modèles, il s'agit de poursuivre l'amélioration de la prise en compte des couplages multi-physiques grâce à des développements des méthodes de calculs (techniques de calcul Haute Performance, solveurs parallèles, décomposition de domaines temps/espace). Les principaux couplages concernent en particulier les processus hydraulique-gaz/mécanique/chimique ainsi que les processus hydrauliques et de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

Outre ces développements, un des axes d'amélioration continue envisagé par l'Andra est le développement d'un jumeau numérique phénoménologique. Cet outil a pour objet de permettre la capitalisation et la fédération de l'ensemble des informations issues de l'installation nucléaire Cigéo, y compris celles en « temps réel » de son fonctionnement, dans un environnement unifié, accessible et lisible au sein duquel la connaissance peut être partagée et visualisée. Le jumeau numérique, mis en œuvre au travers du « *Building Information Management* » (BIM) et de la maquette numérique, permet d'agréger les outils de simulation numérique et le système de traitement des données.

Les études portent sur la préparation de la construction du jumeau numérique phénoménologique de l'installation souterraine (i) en développant un environnement digital permettant l'intégration et la communication des différents outils et données et (ii) en tirant parti de travaux sur des jumeaux numériques à échelle réduite, sur la base de composants étudiés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

En complément, un volet des études concerne celles dédiées aux intelligences artificielles (IA) au regard par exemple de l'amélioration de l'autonomie des IA embarquées sur les systèmes robotisés ou bien pour l'acquisition de métadonnées liées à la réalisation des ouvrages en vue de contribuer efficacement à l'établissement de jumeaux numériques en fournissant des données systématiques et structurées.

2.9 L'organisation temporelle des actions

Ce chapitre reprend les actions détaillées ci-avant sous forme d'un logigramme indiquant leur enchaînement afin de donner une vision intégrée en lien avec le déploiement de l'installation nucléaire Cigéo jusqu'à sa mise en service. Le positionnement de la phase industrielle pilote est également indiqué.

Les logigrammes prévisionnels ci-dessous présentent les principales actions identifiées concernant le quartier pilote HA (cf. Figure 2-43) et les quatre premiers alvéoles MA-VL (cf. Figure 2-44).

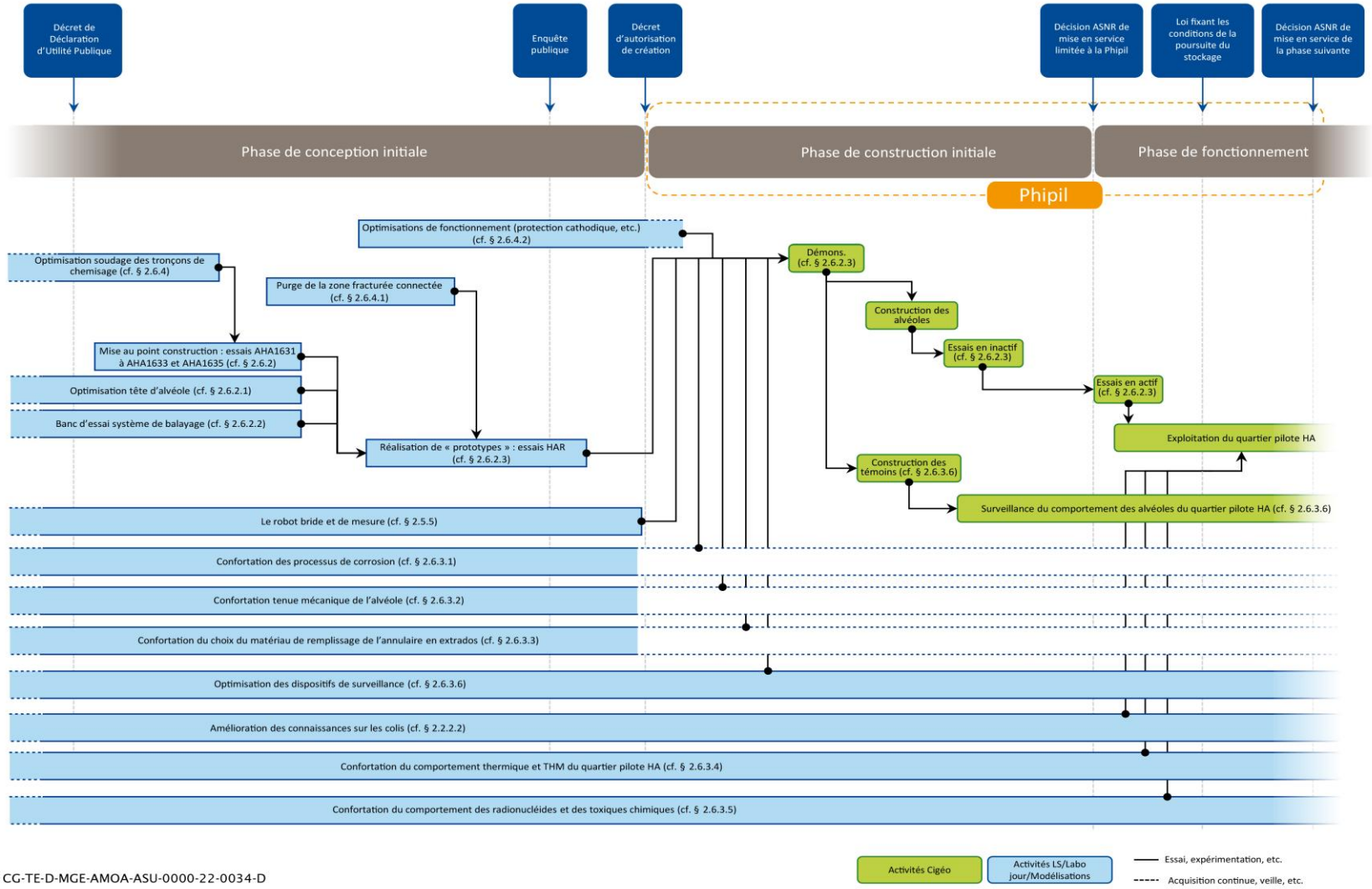


Figure 2-43 *Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives au quartier pilote HA. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions*

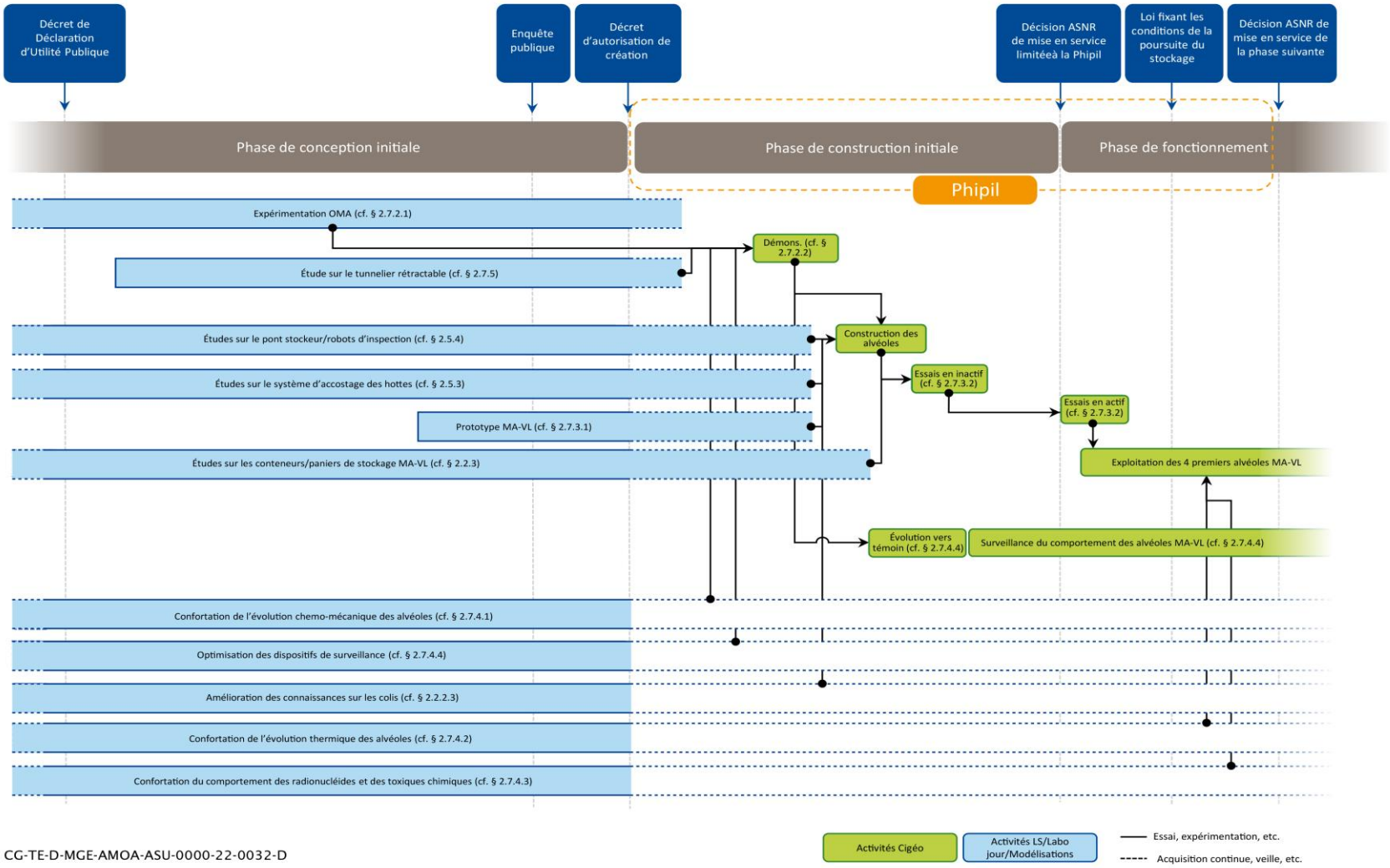


Figure 2-44 *Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives aux quatre premiers alvéoles MA-VL. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions*

3

La préparation de la construction et les mises en service des installations et ouvrages (surface et souterrains) ultérieures

3.1 Les colis de déchets radioactifs 141
3.2 Les installations de surface 152
3.3 Le quartier de stockage HA 154
3.4 Les alvéoles MA-VL des tranches ultérieures 159
3.5 L'organisation temporelle prévisionnelle des actions 163

L'objectif de ce chapitre est de présenter les actions de confortation de conception et de constructibilité ainsi que de qualification du fonctionnement des ouvrages réalisés après la mise en service du quartier pilote HA et des quatre premiers alvéoles MA-VL. Il traite ainsi des tranches ultérieures du quartier de stockage MA-VL et du quartier de stockage HA (cf. Figure 3-1).

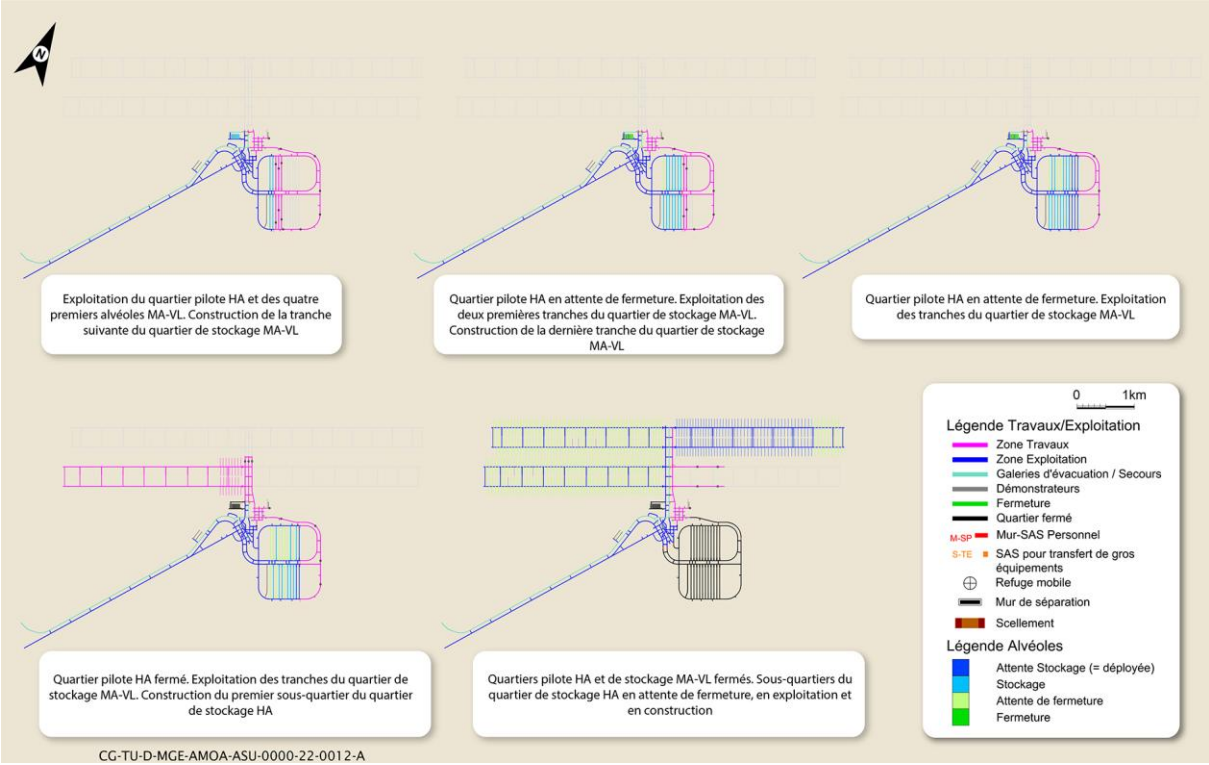


Figure 3-1 Illustration du déploiement temporel de l'installation souterraine des tranches ultérieures

Ce chapitre se décompose selon les composants clés pour cette phase de fonctionnement de l'installation nucléaire Cigéo : les colis concernés par cette phase (cf. Chapitre 3.1 du présent document), les installations de surface (cf. Chapitre 3.3 du présent document), le quartier de stockage HA (cf. Chapitre 3.2 du présent document) et les alvéoles MA-VL des tranches ultérieures (cf. Chapitre 3.4 du présent document). En particulier, le chapitre sur les colis traite de ceux concernés par la conception et de la réalisation des nouveaux alvéoles MA-VL dont ceux dédiés au stockage des colis de déchets bitumés. Pour ces composants, il s'agit de présenter la démarche générale de développement progressif de l'installation nucléaire Cigéo et sa déclinaison opérationnelle, dont en particulier :

- l'apport du retour d'expérience du fonctionnement de la phase industrielle pilote, dont celui issu de la surveillance vis-à-vis de la construction et du fonctionnement de ces nouveaux ouvrages :
  - ✓ l'apport du quartier pilote HA pour la confortation de la conception et de la démonstration de la constructibilité et du fonctionnement des alvéoles HA du quartier de stockage HA ;
  - ✓ l'apport des premiers alvéoles MA-VL pour le déploiement des tranches ultérieures d'alvéoles MA-VL.
- le programme des études et essais pour améliorer la conception et intégrer les avancées technologiques.

Et, de la même façon que pour le chapitre précédent, la dernière partie de ce chapitre (cf. Chapitre 3.5 du présent document) est un chapitre programmatique qui précise les actions déjà en cours ou réalisées au cours des phases précédentes de conception, construction initiale et de mise en service, en vue de pouvoir apporter les éléments nécessaires à la mise en service du quartier de stockage HA et des nouveaux alvéoles MA-VL de l'installation nucléaire Cigéo.

3.1 Les colis de déchets radioactifs

3.1.1 Une démarche continue d'amélioration des connaissances sur les colis de déchets

3.1.1.1 Le développement des conditionnements

Les familles de colis de déchets de l'inventaire de référence sont regroupées en quatre catégories suivant l'état de leur production voire de la définition de leur mode de conditionnement :

- une première catégorie regroupe les familles de colis dont la production est terminée ;
- la deuxième catégorie concerne les familles de colis en cours de production, pour lesquelles le conditionnement des déchets est défini et une spécification de production existe ;
- la troisième catégorie regroupe les familles de colis non encore produites à ce jour mais dont la définition du conditionnement des déchets est déjà bien avancée ;
- la quatrième catégorie concerne les familles de colis non encore produites à ce jour et dont le conditionnement est encore à déterminer.

Les troisièmes et quatrièmes catégories concernent en particulier des familles de colis HA prévues d'être mises en stockage dans le quartier de stockage HA ou des familles MA-VL prévues d'être mises en stockage après la tranche 1.

Pour les familles de la troisième catégorie, les études se poursuivent chez les producteurs, afin de définir leurs modes de conditionnement (*e.g.* conditionnement de déchets contaminés en radionucléides alpha de Cadarache, MELOX et La Hague, conditionnement de déchets irradiants, conditionnement de déchets d'installations en cours de construction telles qu'ITER[33], etc.).

Les familles de colis dites « futures », pour lesquelles le conditionnement des déchets n'est pas encore totalement défini, doivent pouvoir être réceptionnées sur l'installation de stockage Cigéo dans les mêmes conditions que les autres familles déjà produites ou en cours de production. L'autorisation associée à ces futurs conditionnements est encadrée par la décision conditionnement (applicable également aux INB/S) (17). Cette décision prévoit notamment la possibilité d'échanges amont entre le producteur et l'Andra sur la base d'un conditionnement proposé par le producteur, l'Andra vérifiant l'absence de point rédhibitoire vis-à-vis de la conception et de la sûreté du stockage. En cas de difficulté avérée, des leviers pourront être proposés *via* des études complémentaires comme indiqué dans les principes généraux de la Pièce 19 - Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis (18) (cf. Chapitre 1.4.6 du présent document).

Pour ces familles pour lesquelles le conditionnement au moment du dossier de demande d'autorisation de création n'est pas encore défini, en fonction de la maturité technique des études sur le conditionnement, le producteur devra faire une demande d'avis sur conditionnement si les spécifications de production de ces familles ne sont pas encore validées par l'ASNR, ou bien, dans le cas où elles sont validées, le producteur déposera une demande d'approbation (cf. Encadré ci-dessous).

L'APPROBATION DU CONDITIONNEMENT DES DECHETS

La démarche conduisant à l'approbation d'une famille de colis de déchets est cadrée par l'ASN dans sa décision n° 2017-DC-0587 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* » (17).

[33] Déchets issus du réacteur à fusion nucléaire ITER

L'approbation est donnée par l'Andra sur la base des spécifications d'acceptation en stockage validées par l'ASNR. Dans l'attente de spécifications d'acceptation validées, le producteur formule la demande d'accord de conditionnement à l'ASNR.

La mise en œuvre du conditionnement d'un colis de déchets est l'ensemble des opérations réalisées en vue de produire un colis de déchets radioactifs, intermédiaire ou définitif. Ces opérations peuvent notamment consister en l'introduction dans un conteneur, l'immobilisation, le traitement physico-chimique ou l'enrobage de déchets radioactifs.

Les opérations de conditionnement de déchets radioactifs permettent la production de colis de déchets radioactifs définitifs présentant une stabilité physico-chimique appropriée et assurant le confinement des substances radioactives et dangereuses qu'ils contiennent. Ces opérations sont adaptées à la nature et aux caractéristiques des déchets radioactifs et à l'installation de stockage à laquelle ils sont destinés et doivent notamment tenir compte des risques liés aux actions des agents chimiques et biologiques, à l'hétérogénéité de la répartition de déchets et à la production de chaleur dans ce colis.

Avant la mise en œuvre des opérations de conditionnement, le producteur doit obtenir l'accord de conditionnement délivré par l'ASNR ou bien l'approbation de l'Andra si les spécifications d'acceptation en stockage ont été validées par l'ASNR.

Lorsqu'il envisage de produire un nouveau type de colis de déchets radioactifs destiné à être stocké, le producteur peut, préalablement à la demande d'accord de conditionnement ou d'approbation, demander un avis à l'Andra sur les options envisagées pour son projet.

En cas d'évolution de conditionnement en cours de production et conformément à la décision conditionnement, le producteur doit avertir l'Andra de toutes modifications ayant un impact sur un paramètre relevant d'un critère d'acceptation du colis.

Dans le cas des familles de colis dont les propriétés les rendent éligibles au stockage direct, le processus de développement de leur conditionnement prend en compte ces propriétés.

Pour le cas des déchets tritiés issus d'ITER, des études se poursuivent concernant le développement de matrices intégrant des dispositifs de piégeage du tritium, avec l'étude en particulier des effets des conditions d'hygrométrie sur les capacités de piégeage du tritium gazeux sous forme HT (projet MACH[34] piloté par le CEA).

3.1.1.2 Le choix du mode de stockage

L'Andra distingue les modes de stockage (deux modes : stockage direct, stockage en conteneur) des solutions techniques associées (stockage en panier, stockage directement, stockage dans un conteneur standard ou dans un conteneur renforcé vis-à-vis du confinement ou renforcé vis-à-vis de l'incendie, etc.).

Le stockage direct (cf. Encadré ci-dessous) de colis primaire directement en alvéole de stockage MA-VL concerne certaines familles de colis pour lesquelles le colis primaire satisfait aux exigences correspondant à ce type de stockage.

Dans le dossier de demande d'autorisation de création, les familles considérées pour tout ou partie en mode de stockage direct sont définies selon trois catégories :

- les familles pour lesquelles, les éléments de connaissance (caractéristiques, comportement) et les éléments de démonstration de sûreté sont jugés suffisants. C'est le cas des familles EDF conditionnées en C1PG^{SP} , des familles Orano conditionnées en CBFC'2 et CSD-C (catégorie MA-VL5) et des familles CEA conditionnées en 500 L FI ;

[34] Projet MACH^3 : matrices cimentaires pour le piégeage du tritium (^{3}H)

- les familles pour lesquelles l'Andra a « la raisonnable assurance que la démonstration de sûreté nucléaire sera confirmée au moment de la mise à jour du rapport de sûreté établie en vue de la mise en service de la partie concernée de l'installation nucléaire Cigéo. C'est le cas à ce stade des familles CEA conditionnées en 870 L ;
- les familles de colis pour lesquelles le conditionnement est à définir et sous réserve que leur conditionnement au moment de la demande d'avis répond aux exigences spécifiées pour les colis de déchets MA-VL relevant du mode de stockage direct.

Au titre de la flexibilité, un conteneur de stockage est prévu pour les familles éligibles au stockage direct.

D'ici à leur prise en charge dans l'installation nucléaire Cigéo, les études sur les modalités de stockage des familles de déchets nécessitant une confirmation de leur performance au regard des fonctions de sûreté qui leur sont attribuées se poursuivent. Ces études font l'objet de plans d'actions partagés entre les producteurs et l'Andra visant à atteindre le niveau de démonstration requis.

Par ailleurs, pour ces familles et en particulier celles dont le conditionnement n'est pas défini à ce stade, le producteur a proposé un conditionnement permettant une analogie avec des colis primaires existants. La compatibilité des caractéristiques de ces colis primaires, dans le cadre de la demande d'accord de conditionnement, sera évaluée au regard des spécifications d'acceptation applicables. Si besoin, des études complémentaires seront réalisées pour démontrer la sûreté de leur stockage ; un complément de spécifications et/ou une révision du conditionnement de la famille en découlera.

D'ici à leur prise en charge dans l'installation nucléaire Cigéo, les études sur les modalités de conditionnement et de stockage des familles nécessitant une confirmation de leur performance au regard des fonctions de sûreté qui leur sont attribuées se poursuivent.

L'installation nucléaire est par ailleurs conçue de façon à pouvoir évoluer au fur et à mesure de sa construction par tranches successives pour prendre en compte d'éventuelles évolutions de mode de stockage.

Le processus de développement des conditionnements des familles, pour lesquelles le conditionnement est à définir, prend en compte les exigences spécifiées requises pour le stockage direct.

LE STOCKAGE DIRECT DES COLIS MA-VL

Le stockage de colis primaires MA-VL directement en ouvrage de stockage constitue l'un des modes de stockage retenus dans l'installation nucléaire Cigéo (cf. Chapitre 2.2.3 du présent document) (cf. Figure 3-2). Par comparaison avec un stockage en conteneur de tous les colis, le stockage direct contribue à l'augmentation capacitaire des alvéoles et, par conséquent, à la diminution de leur nombre et à la préservation de la ressource stockage.

Le stockage direct de colis primaire directement en alvéole de stockage concerne certaines familles de colis pour lesquelles le colis primaire satisfait aux exigences correspondant au stockage direct concernant :

- le risque d'exposition externe ;
- le risque de dispersion ;
- le risque thermique (principalement en lien avec l'exigence de température de 65 °C fixée pour les bétons de structure ou de confinement) ;
- le risque d'explosion lié à la production d'H_2 par radiolyse ;
- le risque de criticité en exploitation et après-fermeture ;
- le maintien d'une garde saine de Callovo-Oxfordien garanti notamment par le respect d'un taux de vide admissible déterminé pour chaque alvéole.

Dans le cadre de la démarche globale d'évolution et de justification de la configuration retenue dans le dossier de demande de création, un plan d'actions de maîtrise des risques de sûreté a été mis en œuvre au cours de la phase d'études d'avant-projet. À ce stade, ces études confirment la faisabilité technique et la robustesse de la solution de stockage direct, en particulier vis-à-vis des enjeux de sûreté.

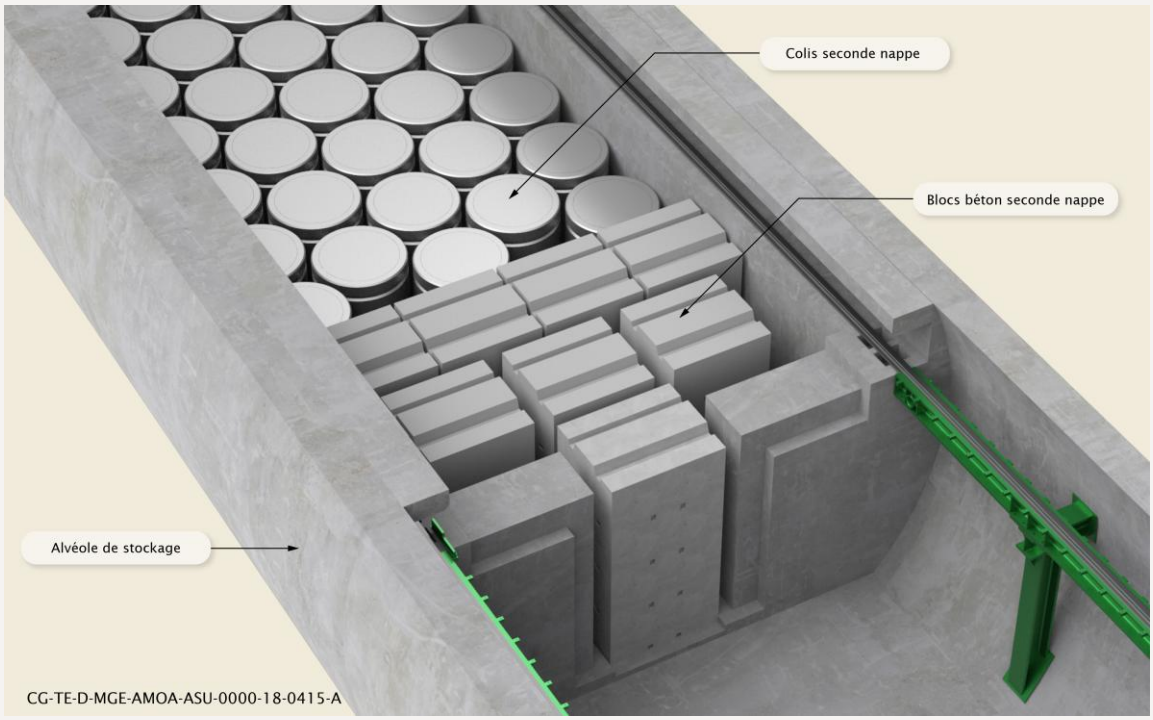


Figure 3-2 Illustration d'un remplissage d'alvéole MA-VL de colis CBF-C'2 en stockage direct

Les colis du type 870 L, produits par le CEA et qui regroupent des colis hétérogènes en termes de mode de conditionnement et de dates de production, sont éligibles au stockage direct.

Un travail commun entre le CEA et l'Andra est mené sur ces colis afin de s'assurer de la prise en charge de l'ensemble des déchets constitués du CEA, le cas échéant *via* la flexibilité apportée par le maintien de solutions de stockage de repli (en conteneur de référence voire en conteneur renforcé) en cas de non-respect des exigences qui auront été définies.

À ce titre, il convient de noter que les éléments de démonstration de la sûreté des entreposages, dans lesquels les colis déjà produits sont placés, reposent sur une démonstration validée par l'ASNR sur la base de la bonne réalisation des colis, un système de détection ainsi que sur leur capacité à identifier et remettre en état le(s) colis concerné(s). Le retour d'expérience des entreposages des producteurs est un élément qui sera ainsi pris en en compte.

3.1.2 Les colis de déchets du quartier de stockage HA et des tranches ultérieures du quartier de stockage MA-VL (colis de déchets bitumés)

Les différentes études relatives au comportement des colis de déchets HA1/HA2 et des colis de déchets MA-VL des tranches ultérieures de fonctionnement de l'INB s'inscrivent dans la démarche d'amélioration continue des connaissances afin de permettre de réduire les incertitudes et supprimer les marges excessives retenues dans les évaluations de sûreté dans l'objectif d'une conception sûre et optimisée.

3.1.2.1 Le comportement des déchets vitrifiés HA exothermiques

Les études relatives aux verres HA1/HA2 visent à réduire les incertitudes et/ou les conservatismes identifiés en lien avec les termes sources retenus pour les évaluations de sûreté (cf. Encadré ci-après). Ces études sont conduites pour partie par les producteurs, en particulier sur les effets de l'auto-irradiation et sur la dégradation des verres dans les conditions d'environnement insaturées des alvéoles de stockage (intégrant l'influence de leur fracturation). Concernant le comportement des radionucléides, les études ont pour objet en particulier d'affiner l'inventaire en sélénium et sa spéciation dans les familles de colis.

LE COMPORTEMENT DES VERRES R7T7

Les déchets HA sont principalement des déchets vitrifiés (99,4 % des colis de déchets HA). L'essentiel de ces déchets vitrifiés est constitué par les verres R7/T7 produits dans les installations de vitrification de l'Établissement de La Hague depuis 1989.

Le comportement de ces déchets vitrifiés a fait l'objet de plus de 20 ans d'études menées par l'Andra, ses homologues et les producteurs de déchets, s'appuyant sur des expérimentations en laboratoire jour et au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne mais également au travers de la caractérisation d'analogues archéologiques (laitiers de hauts-fourneaux) et naturels (basaltes, palagonite, etc.) et de modélisations. Ces travaux ont permis d'acquérir une bonne connaissance de la phénoménologie d'altération en eau pure, puis dans des fluides et en présence des matériaux d'environnement attendus en stockage (eau porale du Callovo-Oxfordien en champ lointain, eau cimentaire, produits de corrosion, argilites).

Des études plus récentes permettent de disposer de premiers éléments sur l'altération du verre en conditions insaturées, conditions attendues pendant le transitoire hydraulique-gaz de resaturation de l'alvéole HA et sur l'influence d'un matériau de remplissage à base cimentaire mis en place à l'extrados du chemisage.

Elles permettent ainsi de disposer d'une bonne connaissance du comportement de ces déchets dans les conditions de stockage permettant d'en décrire l'altération dans le cadre de l'évolution chimique d'un alvéole HA, notamment en lien avec le transitoire hydraulique gaz et suivant l'évolution chimique du matériau cimentaire en extrados du chemisage. Cette dégradation se traduit par un premier régime de vitesse d'altération V_0, suivi d'un second régime de vitesse d'altération V_R, le passage d'un régime à l'autre dépendant des interactions avec l'environnement (cf. Figure 3-3).

L'altération des déchets vitrifiés R7/T7 en stockage, et donc le relâchement des radionucléides qu'ils contiennent, s'effectue selon trois grandes phases consécutives :

- une période qui s'étend jusqu'à la rupture du conteneur de stockage et du conteneur primaire, durant laquelle la matrice vitreuse évolue en absence d'eau ;
- une période pendant laquelle les jeux au sein des alvéoles HA sont désaturés sous l'effet du transitoire hydraulique-gaz conduisant à une altération de la matrice vitreuse par la vapeur d'eau du fait de la forte humidité relative (proche de 100 %) ;

- une période initiée par la resaturation de l'alvéole durant laquelle le verre va s'altérer sous eau liquide ayant percolée au travers des argilites, du matériau de remplissage et des produits de corrosion du chemisage et du conteneur de stockage.

En absence d'eau, les deux phénomènes susceptibles d'induire des modifications physico-chimiques de la matrice vitreuse sont la cristallisation et l'auto-irradiation ne conduisant pas à une modification notable de cette matrice.

En conditions non saturées, le déchets vitrifié R7/T7 subit une hydratation superficielle de sa matrice vitreuse, se traduisant probablement par une modification de la structure du verre en surface, et dont la cinétique décroît progressivement.

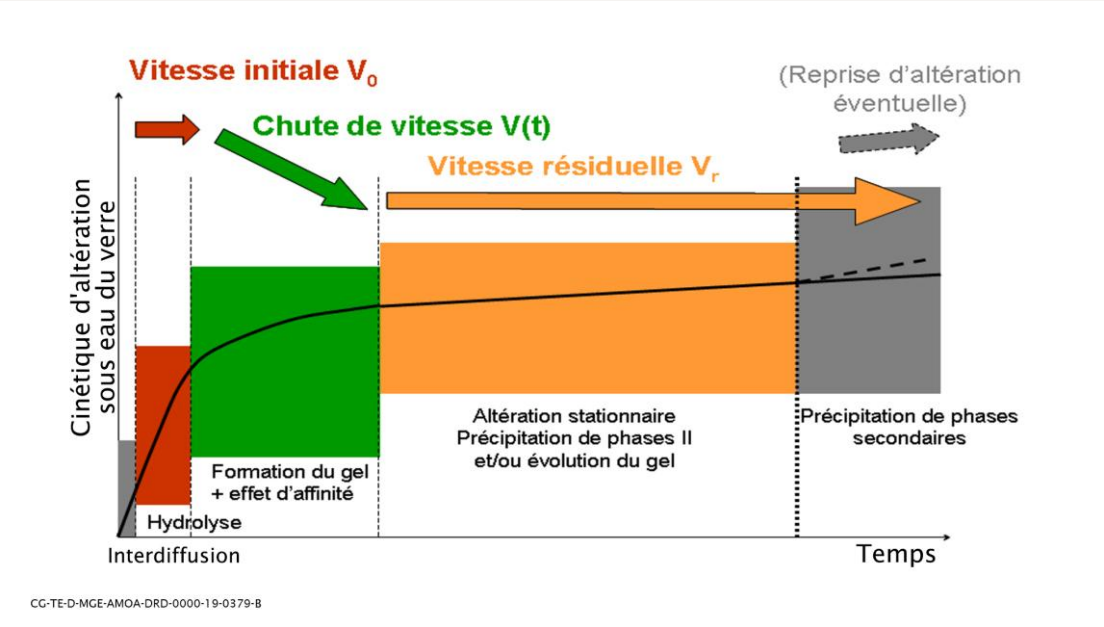


Figure 3-3 Schéma de l'évolution de la cinétique d'altération sous eau du verre

L'ensemble des études sur l'altération des déchets vitrifiés a permis de définir une évolution de l'altération du verre sous eau en fonction du temps qui fait aujourd'hui l'objet d'un consensus international. L'altération sous eau du verre s'effectue suivant trois régimes de vitesse :

- un régime de vitesse initiale principalement piloté par l'hydrolyse du réseau vitreux silicaté ;
- un régime transitoire de chute de vitesse résultant de la diminution du déséquilibre chimique entre le verre et le milieu environnant et la formation d'un gel constituant une barrière de diffusion entre le verre et le milieu environnant ;
- un régime de vitesse résiduelle qui est fonction des conditions d'environnement dont vont dépendre d'une part l'évolution chimique du gel et par conséquent ses propriétés de transport et de barrière diffusive et, d'autre part, la néoformation de phases secondaires pouvant se faire au détriment du gel.

Un certain nombre de facteurs peuvent influencer ces différentes cinétiques de dissolution comme par exemple l'auto-irradiation du verre. Par ailleurs, la quantité de verre altéré dépend des cinétiques de dissolution du verre mais également de son taux de fracturation.

D'autres études sont menées par l'Andra autour de deux axes :

- une intégration du comportement des déchets vitrifiés au sein de l'alvéole HA prenant en compte les effets (i) des conditions d'environnement de l'alvéole (température, hygrométrie) et (ii) des composants ouvragés de l'alvéole (conteneur de stockage, conteneur primaire, MREA, etc.) et de leur évolution dans le temps (produits de corrosion, chimie de l'eau au voisinage du verre, etc.). Il s'agit en particulier de mieux préciser les couplages en lien avec l'évolution thermique, hydraulique et géochimique de l'alvéole HA et leurs conséquences sur le comportement et la cinétique de dissolution des verres et de conforter ainsi les modèles de comportement de ces verres retenus dans les évaluations de sûreté. Ces travaux s'appuieront sur des essais jours et en laboratoire souterrain ;
- en lien avec le point ci-dessus, au regard des choix prudents retenus au stade du dossier de demande d'autorisation de création, des modélisations seront réalisées afin de représenter au plus près de la réalité (température, chimie, saturation, etc.) le comportement des déchets vitrifiés en interface avec les matériaux de l'alvéole HA (produits de corrosion, matériau de remplissage, etc.) à l'aide de nouveaux modèles couplés plus mécanistiques et des résultats d'essais jour et *in situ* (notamment les essais *in situ* de longue durée MAV3002, MAV3003, MCO1214 et MCO1215 dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne).

Ces études permettront de préciser les marges par rapport aux évaluations de sûreté en après-fermeture considérant un état saturé.

3.1.2.2 Le comportement des déchets MA-VL des tranches ultérieures du quartier de stockage MA-VL

Les colis de déchets MA-VL mis en stockage lors des tranches ultérieures recouvrent différentes natures de déchets (sels, matériaux métalliques, matériaux organiques, graphite, etc.) et de matrices (cimentaire, vitreuse, etc.).

De la même façon que pour les familles de déchets MA-VL de la tranche 1, les connaissances sur le comportement dans les conditions de stockage (termes sources, etc.) des colis déjà produits sont bien maîtrisées suite aux nombreuses études menées sur plusieurs dizaines d'années de recherche. Ainsi, les actions relatives à ces colis relèvent de la démarche continue d'acquisition de connaissances permettant de maîtriser les marges de sûreté en réduisant les incertitudes et/ou les conservatismes identifiés.

Outre les catégories de déchets reçues en tranche 1, les tranches ultérieures vont recevoir des déchets de catégorie 1 (déchets salins) et de catégorie 2 (déchets bitumés). Les comportements des déchets salins sont bien maîtrisés ; ceux des colis de déchets bitumés sont traités au chapitre 3.1.4 du présent document.

Une partie des familles de déchets attendues en tranches 2 et 3 ne sont pas encore produites ; cela peut concerner des déchets pour lesquels le procédé de traitement est encore en phase de développement (*e.g.* déchets contaminés en radionucléides alpha), ou bien dont le conditionnement n'est pas défini (*e.g.* déchets magnésiens). Les principales études concernent ainsi le traitement et/ou le conditionnement de ces déchets avec divers objectifs tels que l'amélioration de la sûreté en stockage, la limitation des impacts sur l'environnement, l'optimisation des coûts ou encore la facilitation de la prise en charge des colis de déchets.

À titre d'exemple, les procédés mis en œuvre peuvent permettre de rendre inerte le déchet (réduction ou élimination de la réactivité), de réduire son volume, de limiter la production de gaz, d'adapter ou de mettre en forme le déchet avant conditionnement (cas d'un déchet liquide, gazeux ou pulvérulent par exemple), etc. Ces études sont conduites par les producteurs de ces déchets.

Le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques par les différents colis de déchets est fonction de la nature des déchets et de la localisation des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Ce processus est maîtrisé pour les différentes familles de déchets MA-VL déjà produites ainsi que pour celles à produire qui seront similaires à celles déjà produites. Dans le cadre de l'amélioration continue des connaissances, la mise en œuvre de nouveau conditionnement ou bien la production de familles selon de nouveaux procédés (*e.g.* famille de déchets contaminés en radionucléides alpha) conduira à mener des études afin de caractériser le relâchement de leur inventaire en radionucléides et en substances toxiques chimiques.

3.1.3 Les conteneurs de stockage HA et MA-VL

Les actions menées concernent le développement d'optimisation des concepts, en particulier l'emploi de nouveaux matériaux.

L'enjeu du développement de matériaux non métalliques pour le chemisage et le conteneur de stockage HA vise, à mêmes fonctions de ces composants, la limitation de la production d'hydrogène par corrosion des aciers actuellement retenus :

- en phase de fonctionnement, pour conforter l'exclusion du risque de formation d'une atmosphère explosive (risque Atex) et indirectement simplifier la conception de l'alvéole HA (tête, dispositif d'inertage) et réduire les coûts ;
- en après-fermeture sur le long terme, pour contribuer à réduire le transitoire hydraulique-gaz (pression maximale de gaz, durée, etc.) et corrélativement accroître les marges de sûreté, plus particulièrement vis-à-vis de la fracturation au gaz du Callovo-Oxfordien en grand.

L'Andra a déjà mené des études préliminaires sur un ensemble de matériaux :

- des céramiques pour les conteneurs de stockage ;
- des composites à matrice céramique (CMC) pour les chemisages.

Ces études se sont appuyées sur des connaissances/travaux antérieurs souvent hors de la filière nucléaire comme par exemple le scellement de pièces céramiques pluri-centimétriques à l'échelle du laboratoire par chauffage micro-ondes ou le dimensionnement, sur la base de matériaux commerciaux de l'aéronautique, de composites CMC répondant aux contraintes mécaniques de chargement dans l'alvéole HA.

Les activités scientifiques et technologiques intègrent le développement et la caractérisation des matériaux, la fabrication de prototypes et leurs tests à échelle réduite *in situ* au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. En particulier, les actions concernant l'utilisation de céramique pour le conteneur portent sur la réalisation de prototype de conteneur et son scellement et pour le chemisage sur les optimisations de processus de mise en œuvre et l'étude de leur comportement mécanique.

3.1.4 Le cas des déchets bitumés

Les colis de déchets bitumés se composent de boues issues du traitement par co-précipitation des effluents radioactifs des établissements de Marcoule et de La Hague qui, après essorage et séchage, ont été enrobées dans du bitume. Cette matrice a été choisie pour ses propriétés de confinement sur le long terme.

Dans sa lettre du 12 janvier 2018 (1), suite à l'instruction du dossier d'options de sûreté par l'IRSN et aux réunions du Groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD) les 18 et 19 mai 2017 et après consultation du public sur son projet d'avis du 1er août au 15 septembre 2017, l'ASN estime 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* ».

À la demande conjointe du ministre de la transition écologique et solidaire et de l'ASN, une revue externe a été menée par des experts français et internationaux dans le domaine de la gestion des déchets bitumés, qui ont rendu leur rapport en juin 2019. La revue a notamment estimé au stade de la connaissance que les deux voies de gestion des déchets bitumés, que sont la neutralisation et le stockage en l'état, sont possibles.

Par ailleurs, dans le cadre du PNGMDR[35] 2016-2018, des études sur les différents procédés de traitement et leur industrialisation ont été menées et une démarche sur la base d'hypothèses enveloppes pour la conception et la démonstration de sûreté a été définie. Ces éléments ont également fait l'objet d'instructions par l'ASN.

Sur la base des différents avis et recommandations (revue internationale par des experts et avis ASN) parus depuis l'instruction du dossier d'options de sûreté, l'Andra a intégré dans ses études de conception et de sûreté en support à la demande d'autorisation de création deux voies de gestion pour le stockage des déchets bitumés sans préjuger d'une voie préférentiellement à une autre, au titre de la flexibilité (10) :

- un stockage de colis de déchets issus d'un traitement visant la neutralisation des déchets bitumés (cf. Chapitre 3.1.4.1 du présent document) ;
- un stockage de fûts de déchets bitumés en l'état (sans traitement préalable) mis dans des conteneurs en béton « renforcés » vis-à-vis de l'incendie avant leur transfert et leur mise en stockage dans des alvéoles dédiés (cf. Chapitre 3.1.4.2 du présent document) renforcés par rapport aux alvéoles de stockage des autres déchets MA-VL.

En lien avec le développement progressif de l'installation nucléaire Cigéo et dans une démarche prudente, l'Andra ne prévoit pas que soient stockés ces colis dans les premiers alvéoles mis en service.

La décision sur le choix du traitement des fûts de déchets bitumés ou de leur stockage en l'état répondra aux éléments support à la demande d'autorisation du stockage de ces colis prévue dans les tranches de développement du quartier de stockage MA-VL ultérieures à la tranche 1.

3.1.4.1 Le stockage des colis des colis issus d'un traitement des colis de déchets bitumés

Les études sur le traitement des colis bitumés en réponse à l'article 48 du PNGMDR 2016-2018 sont pilotées par le CEA et rassemblant des experts de l'Andra, du CEA, d'Orano et d'EDF (45). Elles ont porté, dans un premier temps, sur l'identification de différents procédés de traitement potentiels et, dans un second temps, sur une analyse de type multicritère de ces procédés. Différentes briques technologiques ont été identifiées et assemblées sous forme de filière de traitement, chacune visant soit à rendre le déchet compatible avec l'opération de traitement (pré-traitement), soit à neutraliser la réactivité du déchet (bitume et/ou sels) (traitement), soit à conditionner les résidus pour une mise en stockage finale à définir (post-traitement). Les réflexions ont porté sur le traitement de l'ensemble des fûts de déchets bitumés des établissements de La Hague et de Marcoule.

À l'issue de ces études, trois filières de traitement des déchets bitumés, toutes mettant en œuvre un procédé de type thermique, ont été identifiées comme présentant le meilleur potentiel et ont fait l'objet d'études d'ingénierie de niveau pré-faisabilité pour en évaluer la pertinence technico-économique. Ces filières de traitement sont :

- filière 1 : « incinération/vitrification » ;
- filière 2 : « combustion classique suivie d'un conditionnement par cimentation ou vitrification » ;
- filière 3 : « vaporeformage suivi d'un conditionnement par cimentation ».

Dans tous les cas, les spécificités du bitume ont conduit à identifier les principales incertitudes techniques à lever. Les principaux axes d'un programme de R&D, d'une durée estimée supérieure à 15 ans, ont été identifiés (46).

Les colis issus du procédé de traitement retenu pourront être stockés dans des alvéoles du quartier de stockage MA-VL ou au sein du quartier de stockage HA, en intercalaire des colis HA1/HA2.

Le stockage des colis de déchets issus du traitement des colis de déchets bitumés ne nécessite pas d'adaptation spécifique des alvéoles.

[35] PNGMDR : Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs

3.1.4.2 Le stockage des colis de déchets bitumés en l'état

La conception de l'alvéole de stockage de colis de déchets bitumés en l'état a suivi une démarche itérative entre d'une part les phases de conception et d'analyse de sûreté tout au long du fonctionnement de l'INB pour vérifier le niveau de protection des personnes et de l'environnement et l'améliorer en tant que de besoin (notamment au regard des exigences fixées par la réglementation, aux objectifs de protection des intérêts et des meilleures techniques disponibles/pratiques les plus récentes) et, d'autre part, les recommandations des experts ayant eu à se prononcer.

La conception de l'alvéole de stockage de colis de déchets bitumés en l'état a évolué suivant la logique normale d'un projet, par exemple pour le diamètre excavé de l'alvéole, et en réponse aux demandes spécifiques pour les fûts de déchets bitumés issues de revues (cf. Encadré ci-dessous).

La conception actuelle correspond à un niveau d'études d'avant-projet sommaire. Il s'agit donc par la suite de continuer les études de conception de cet alvéole afin d'aboutir à un niveau de description permettant de viser sa mise en service dans une tranche ultérieure à la tranche 1 du quartier de stockage MA-VL le cas échéant.

Les choix de conception du conteneur de stockage MA-VL (choix du matériau constitutif, géométrie, dimensions) ont été réalisés très tôt durant la phase d'étude de faisabilité d'un stockage en couche géologique profonde de ce type de déchets. Puis, de manière itérative, des phases de réalisation, d'essais et de conception ont été menées pour en consolider la conception et la réalisation industrielle futures de ces conteneurs de stockage.

» LE STOCKAGE DES COLIS DE DÉCHETS BITUMES EN L'ÉTAT

Des dispositions particulières sont prévues au sein de l'alvéole dédié au stockage des colis de déchets bitumés pour maîtriser le risque de réactions chimiques exothermiques dans l'enrobé en cas de montée en température.

Le conteneur de stockage et l'alvéole sont renforcés :

- le conteneur de stockage renforcé vis-à-vis de l'incendie est constitué de béton fibré et d'une épaisseur permettant de protéger les fûts de déchets bitumés à l'intérieur ;
- l'alvéole présente les spécificités suivantes :
  - ✓ l'aménagement de la partie utile de stockage permet d'intervenir au sein de l'alvéole (pont de manutention et robot d'intervention). Sur une capacité totale de trois nappes, seules les deux nappes inférieures sont occupées par des colis de stockage. Le troisième niveau de nappe est comblé par des blocs de remplissage lors des opérations de fermeture de l'alvéole afin de minimiser les vides ;
  - ✓ le pont de manutention polyvalent permet la mise en place et le retrait des colis par une manutention par le dessus du conteneur de stockage et permet, si besoin, le refroidissement des colis de stockage par aspersion d'eau ;
  - ✓ le robot d'intervention permet le refroidissement si besoin des colis de stockage par aspersion d'eau ;
  - ✓ des moyens de surveillance d'une part fixes, des fibres optiques sont positionnés dans le radier et en voûte de l'alvéole, d'autre part mobiles positionnés sur le pont de manutention et sur le robot d'intervention permettent un suivi de la température des colis de stockage.

LE PROGRAMME QUADRIPARTITE

Le programme quadripartite appelé Babylone (EDF/Orano/CEA/Andra) se décline selon trois volets expérimentaux et de modélisation, à savoir :

- volet 1 : complément du domaine de composition et robustesse des analyses de réactivité :
  - ✓ compléter la connaissance de la réactivité chimique des déchets bitumés par une étude pour ceux issus des effluents aluminifères et ceux comprenant des solvants dégradés de sorte à disposer de l'ensemble des données requises pour toutes les familles de fût de déchets bitumés produits pour leur acceptation dans l'installation nucléaire Cigéo ;
  - ✓ confirmer la plage de 150 °C à 180 °C comme température minimale de déclenchement de réactions exothermiques conduisant à un auto-échauffement, incluant les effets liés à variabilité de composition des fûts des colis de déchets bitumés ;
  - ✓ déterminer les incertitudes et modéliser de façon réaliste mais enveloppe, la réactivité chimique afin de disposer de marges vis-à-vis de la sûreté.
- volet 2 : la maîtrise des effets d'échelle et des effets du vieillissement (irradiation) :
  - ✓ valider le modèle thermique au-delà de l'échelle d'un échantillon d'un kilogramme avec un essai à l'échelle réelle ;
  - ✓ confirmer l'absence d'effet significatif pour la sûreté des évolutions de propriétés physiques de l'enrobé lors des 1res dizaines d'années d'irradiation et jusqu'à la fin de la période d'exploitation ;
  - ✓ confirmer la validité des modèles thermiques à partir des données thermiques acquises sur les enrobés réels (actifs).
- volet 3 : l'acquisition de données en support aux évaluations après-fermeture sur le gonflement des déchets bitumés par reprise d'eau :
  - ✓ consolider l'approche simplifiée et pénalisante retenue pour le dossier de demande d'autorisation de création ;
  - ✓ quantifier les marges de sûreté, notamment par la prise en compte de la relation reliant la pression de gonflement des déchets bitumés à leur déformation. Ces travaux intégreront également la variabilité de composition des déchets bitumés.

En parallèle des actions qui seront menées dans le cadre du programme quadripartite (cf. Encadré ci-dessus), les études sur la base de la conception actuelle de l'alvéole de stockage de colis de déchets bitumés concerneront plus particulièrement l'approfondissement de la conception des moyens de manutention et des dispositifs de surveillance ainsi que des moyens d'intervention dans l'alvéole. À ce jour, l'Andra a identifié les axes de travaux correspondant au déroulement normal des études de conception :

- la caractérisation du comportement des colis de déchets bitumés en situation de stockage en conteneurs au regard du risque incendie ;
- la conception et la qualification du système de préhension et du système de manutention à câble du pont de manutention polyvalent ;
- la conception et la qualification d'un robot d'intervention ;
- la qualification du système de surveillance de la température en alvéole par fibre optique.

3.2 Les installations de surface

Après la mise en service du bâtiment nucléaire de surface EP1 et en tranche ultérieure, l'ouvrage de déchargement des emballages de transport à déchargement Horizontal (ETH) puis le bâtiment nucléaire de surface « exploitation phase 2 » (EP2) seront construits. Les bâtiments ETH et EP2 sont destinés à recevoir respectivement :

- les colis primaires de moyenne activité MA-VL spécifiquement réceptionnés en emballages de transport à déchargement horizontal ;
- les colis primaires stockés dans le quartier de stockage HA.

Leurs descriptions actuelles répondent aux besoins identifiés à date pour le stockage de colis de déchets dont la chronique de livraison n'est pas prévue pour la mise en service de la première tranche de l'installation nucléaire Cigéo en phase industrielle pilote. Les orientations stratégiques futures de la filière nucléaire peuvent amener à adapter la conception de ces deux ouvrages au regard des choix de gouvernance du projet faits d'ici là. Du fait du déploiement ultérieur de ces ouvrages, les études de conception détaillée menées en support à leur demande de mise en service intégreront ces éventuelles évolutions.

À ce stade, seules les mesures conservatoires associées sont présentées ci-après. Les études de conception détaillée seront menées en support de leur demande de mise en service en intégrant les acquis de connaissances qui seront réalisés d'ici là, comme par exemple sur les emballages de transport ou les familles de colis s'il y a lieu.

3.2.1 L'ouvrage de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal (ETH)

L'ouvrage de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal (ETH) sera raccordé au bâtiment nucléaire de surface EP1 après la mise en service de la première tranche de l'installation nucléaire Cigéo en phase industrielle pilote pour la mise en service des tranches ultérieures. Pour ce faire une emprise foncière lui est réservée dans le cadre de l'aménagement de la zone descenderie.

En termes de mesures conservatoires complémentaires, le bâtiment nucléaire de surface EP1 a été étudié dès l'origine dans l'objectif de permettre la jonction d'un ouvrage construit en tranche ultérieure (principe de voiles fusibles notamment). Cela se concrétise par la possibilité de raccorder l'ETH au bâtiment nucléaire de surface EP1 par un tunnel de transfert, positionné afin d'assurer la mutualisation d'un transbordeur entre les deux, assurant ainsi une continuité de la manutention. Par ailleurs le tunnel de transfert permet également l'extension de certains réseaux depuis le bâtiment nucléaire de surface EP1 (électricité de puissance, contrôle commande et conduite, fluides, ventilation). Les accès du personnel se font également à partir du bâtiment nucléaire de surface EP1. Ces dispositions concourent à mutualiser au maximum les ressources disponibles.

3.2.2 Le bâtiment nucléaire de surface EP2

Le bâtiment nucléaire de surface « exploitation phase 2 » (EP2) est construit ultérieurement à la phase industrielle pilote, en vue d'une mise en service à l'horizon 2080. L'objectif principal de cet ouvrage est de permettre la réception des colis de haute activité (HA), notamment les colis HA1 et HA2, ainsi que certains colis MA-VL vitrifiés stockés dans le quartier de stockage HA.

Une emprise foncière lui est allouée dans le cadre de l'évolution du plan d'aménagement de la zone descenderie et de l'évolution du périmètre foncier de l'installation nucléaire Cigéo.

Le bâtiment nucléaire de surface EP2 est raccordé aux installations existantes par une jonction à l'est de la tête de descenderie, laquelle comprend des dispositions constructives afin de faciliter le raccordement par un ouvrage de liaison.

Un embranchement ferré au niveau du terminal ferroviaire nucléaire de l'installation nucléaire Cigéo est prévu en vue d'orienter les wagons vers le bâtiment nucléaire de surface EP2.

La conception de l'installation nucléaire prévoit la possibilité d'une période de fonctionnement commune des deux bâtiments nucléaires de surface EP1 et EP2. Pendant cette période, certaines fonctions et activités seront transférées du bâtiment nucléaire de surface EP1 vers le bâtiment nucléaire de surface EP2 afin qu'à l'issue de la période de fonctionnement commune, le bâtiment nucléaire de surface EP2 soit autonome.

3.3 Le quartier de stockage HA

3.3.1 La démarche progressive de développement et de qualification de la réalisation et du fonctionnement du quartier de stockage HA

3.3.1.1 Le quartier de stockage HA

Si la décision du Parlement est de poursuivre le stockage après la phase industrielle pilote, les colis de déchets HA seront accueillis dans le quartier de stockage HA à l'horizon de 2080.

Dans le cadre de la demande d'autorisation de création, la conception et le fonctionnement du quartier de stockage HA et de ses alvéoles s'appuient sur des principes similaires à ceux retenus pour le quartier pilote HA (cf. Chapitre 2.6 du présent document).

Le quartier de stockage HA comporte des alvéoles de stockage de colis de déchets fortement exothermiques regroupés en quatre sous-quartiers (cf. Figure 3-4). Environ un millier d'alvéoles HA doivent être réalisés.

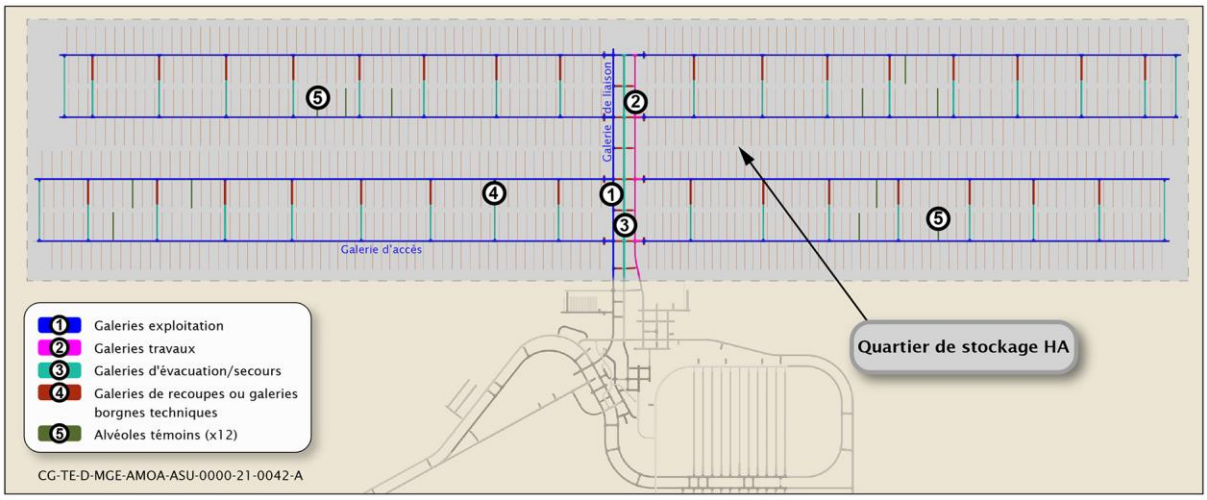


Figure 3-4 *Illustration du quartier de stockage HA à terminaison avec les ouvrages hors alvéoles*

3.3.1.2 Les outils de la progressivité : le « système pilote »

Le développement progressif de l'installation nucléaire Cigéo permet l'intégration progressive aux futures tranches de construction des améliorations rendues possibles par les progrès scientifiques et technologiques sur la durée d'ordre séculaire du projet.

Ainsi, la progressivité du développement du quartier de stockage HA s'appuie sur un ensemble d'éléments complémentaires concourant à consolider la conception et le fonctionnement de ce quartier.

Tout d'abord, il s'agit de l'ensemble des essais et des études de démonstration de constructibilité et de fonctionnement réalisés pour le quartier de stockage HA tel que présenté dans le dossier de demande autorisation de création ainsi que ceux prévus afin de conforter ces éléments (cf. ci-dessous au chapitre 3.3.1.3 du présent document).

Cette démarche progressive d'ensemble s'appuie ensuite sur l'intégration des enseignements issus du fonctionnement du quartier pilote HA dans ses phases successives d'exploitation en inactif et en actif qui permettent d'alimenter la préparation de la construction du quartier de stockage HA, avec notamment la confortation des modèles phénoménologiques associés au dimensionnement thermo-hydro-mécanique (THM) à l'échelle du quartier (cf. Chapitre 3.3.2.1 du présent document), la validation des éléments de conception retenus ainsi que celle des modalités d'exploitation et de surveillance (cf. Chapitre 2.6 du présent document).

Cette progressivité du développement du quartier de stockage HA permet également s'il y a lieu de prendre en compte dans sa conception des avancées technologiques et de connaissance et de permettre la réalisation d'un quartier avec un concept optimisé du concept actuel ou un concept différent (appelé variante) (cf. Chapitre 3.3.3 du présent document).

Une fois la conception des alvéoles du quartier de stockage HA arrêtée, la démarche de réalisation des alvéoles du quartier de stockage HA puis de leur mise en service est similaire à celle retenue pour les alvéoles du quartier pilote HA, avec la construction des alvéoles, leur recette et la réalisation des essais de leur fonctionnement d'ensemble au regard de leurs performances de sûreté (essais en inactif, essais en actif, etc.).

3.3.1.3 Les éléments support à la confortation de la constructibilité et du fonctionnement de l'alvéole du quartier de stockage HA

Le concept actuel retenu dans le dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire Cigéo pour la réalisation des alvéoles du quartier de stockage HA est similaire à celui d'un alvéole du quartier pilote HA, avec quelques spécificités.

Il s'agit principalement de la longueur de l'alvéole (à ce stade, 150 mètres *vs* 80 mètres). Ainsi, des études sont mises en œuvre afin de conforter la constructibilité de l'alvéole pour cette longueur de 150 mètres de long, sans préjuger de développements futurs relatifs à un allongement au-delà de 150 m (intégrant le retour d'expérience de l'exploitation du quartier pilote HA et des évolutions technologiques disponibles) qui pourraient être mis en œuvre d'ici la mise en service envisagée à l'horizon 2080. Elles sont de deux types :

- tout d'abord il s'agit de la réalisation dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne d'un essai de creusement d'un alvéole de 150 mètres (essai AHA1634) ;
- par la suite, un démonstrateur de constructibilité d'un tel alvéole sera réalisé dans la zone de soutien logistique travaux dans laquelle un emplacement a été réservé.

3.3.2 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances

Les spécificités des colis HA1/HA2 placés dans le quartier de stockage HA par rapport aux colis HA faiblement exothermiques stockés dans le quartier pilote HA nécessitent des études complémentaires afin de conforter les évaluations de sûreté et de mieux en caractériser les marges.

La confortation de la sûreté en après fermeture du comportement du quartier de stockage HA se décline au travers de deux thématiques principales : le dimensionnement thermique et THM du quartier de stockage HA (cf. Chapitre 3.3.2.1 du présent document) et le comportement des déchets HA1/HA2 et des radionucléides et des substances toxiques chimiques (cf. Chapitre 3.3.2.2 du présent document).

3.3.2.1 Le dimensionnement thermique et THM du quartier de stockage HA

Les pré-dimensionnements thermique et THM des quartiers pilote et de stockage HA portés au dossier de demande d'autorisation de création sont des points de convergence entre le respect de critères de sûreté et la recherche d'une compacité en lien avec la maîtrise du coût global de possession. Ils s'appuient à ce stade sur une démarche prudente vis-à-vis du dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique avec des marges de différentes natures, en tant que de besoin : critères prudents et modèles intégrant des marges d'abord prudentes (quartier pilote HA) et de plus en plus optimisées (quartier de stockage HA).

Ces pré-dimensionnements s'appuient sur les travaux de caractérisation du Callovo-Oxfordien déjà réalisés (depuis la surface *via* les campagnes sismiques 2D et 3D et au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (cf. Encadré ci-dessous).

LE DIMENSIONNEMENT THERMIQUE ET THM DU QUARTIER DE STOCKAGE HA

Le dégagement thermique des colis de déchets HA (et dans une moindre mesure de certains colis de déchets MA-VL) entraîne une élévation transitoire de température dans les ouvrages souterrains et dans la formation du Callovo-Oxfordien.

À grande échelle, le processus de transfert dominant de la chaleur au sein de la formation du Callovo-Oxfordien est la conduction thermique (suivant la loi de Fourier) et il n'est pratiquement pas influencé par les autres processus physiques : par exemple, il n'y a pas de thermoconvection à grande échelle compte tenu de la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et des faibles gradients de température (cf. Figure 3-5).

L'élévation transitoire de température génère de manière transitoire des déformations, des contraintes thermo-hydro-mécaniques et des surpressions interstitielles dans le Callovo-Oxfordien.

Ces processus sont pris en compte dans la conception par des exigences visant à garantir la préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien et, plus particulièrement, à exclure le risque de fracturation en grand du Callovo-Oxfordien en fonctionnement normal. L'Andra a dimensionné de façon prudente le quartier pilote HA et de façon plus optimisée le quartier de stockage HA. Ce dimensionnement est contraint par le respect de deux exigences, l'une liée à la température maximale dans le Callovo-Oxfordien et l'autre liée au critère de fracturation mécanique du Callovo-Oxfordien du fait de la mise en charge thermo-hydro-mécanique (THM) associée à une surpression interstitielle. Ce dimensionnement thermique et THM détermine l'extension des quartiers pilote et de stockage HA à travers l'identification de la configuration géométrique (nombre de colis par alvéole et entraxe entre alvéole) respectant les critères de dimensionnement.

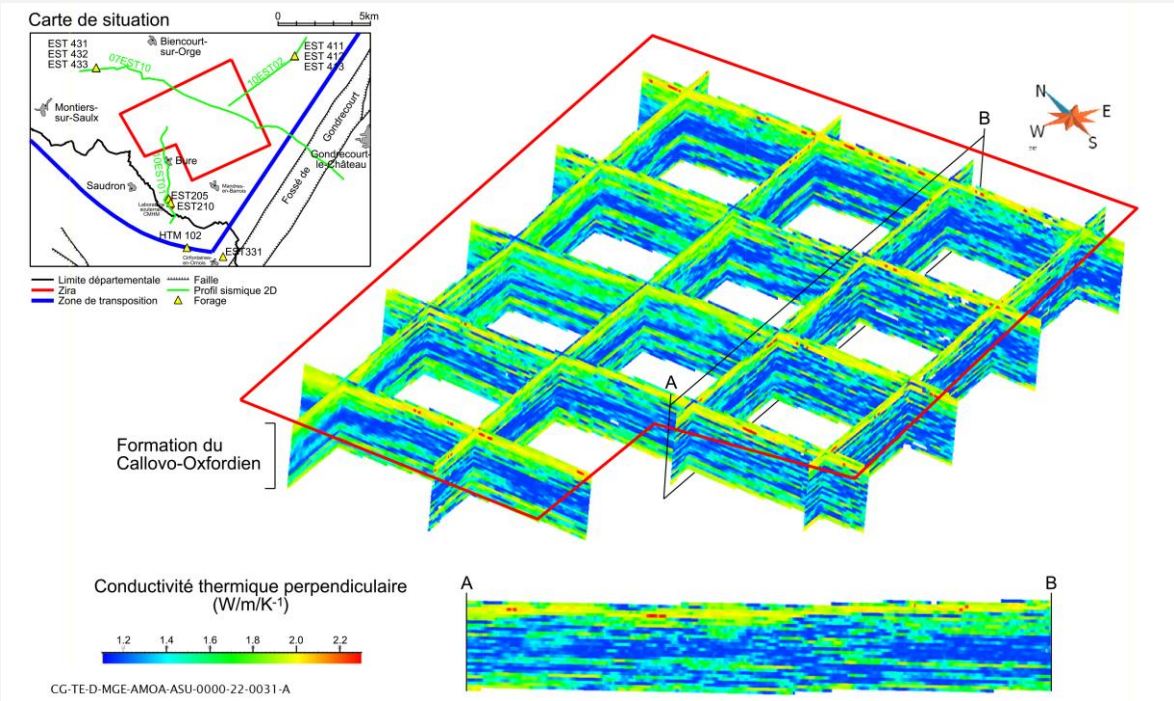


Figure 3-5 *Champ de conductivités thermiques 3D du Callovo-Oxfordien estimé sur la ZIRA à partir de la sismique 3D haute résolution*

Ces prédimensionnements seront mis à jour à l'aune des données issues des campagnes de reconnaissances futures (*e.g.* la campagne de forages profonds ZBS) et du retour d'expérience des activités de reconnaissance à l'avancement pendant la phase de construction initiale.

En complément de l'optimisation du modèle de comportement THM qui sera retenu pour le dimensionnement du quartier de stockage HA, le suivi du comportement du quartier pilote HA contribuera en tant que de besoin aux progrès de la modélisation thermo-hydro-mécanique et ces derniers pourront permettre d'optimiser la conception de l'architecture du quartier de stockage HA, notamment la valeur de l'entraxe entre les alvéoles (distance séparant deux alvéoles) et le nombre de colis de stockage contenus dans chacun d'eux.

3.3.2.2 Le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans le quartier de stockage HA

Les actions relatives au comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques issus de la dissolution des déchets HA1/HA2 s'inscrivent dans la démarche continue d'acquisition de connaissances permettant de maîtriser les marges de sûreté en réduisant les incertitudes et/ou les conservatismes identifiés.

Ainsi, en parallèle des études se poursuivent afin de conforter les connaissances sur les processus de dissolution des déchets HA1/HA2 et leurs effets sur le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques (cf. Chapitre 3.1.2.1 du présent document).

3.3.3 Les optimisations et les évolutions possibles de concept du quartier de stockage HA

En parallèle de la capitalisation des acquis de connaissances issus de la construction, de l'exploitation et de la fermeture du quartier pilote HA ainsi que de ceux issus des essais menés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et du(des) démonstrateur(s) développé(s) dans l'installation souterraine, des actions seront menées concernant le développement du quartier de stockage HA et du concept de ses alvéoles retenu à ce stade (cf. Chapitre 3.3.3.1 du présent document) en termes d'optimisation, ainsi que d'évolutions possibles du concept d'alvéole (cf. Chapitre 3.3.3.2 du présent document). Outre les aspects de conception, les optimisations et les évolutions de conception peuvent également concerner les matériaux retenus.

Les optimisations relèvent d'amélioration de la conception du quartier de stockage HA et du concept d'alvéole portés au dossier de demande d'autorisation de création en termes de considération technico-économiques et/ou de sûreté ne conduisant pas à une conception et/ou un fonctionnement du quartier de stockage HA et de ses alvéoles en rupture avec ceux retenus dans le dossier de demande d'autorisation de création.

Une partie de ces études peuvent être réalisées dans l'installation nucléaire Cigéo, en zone de soutien logistique travaux par exemple afin de limiter les interactions avec le fonctionnement de l'installation, dans le quartier pilote HA ou bien dans la zone réservée pour une possible extension du quartier pilote HA.

3.3.3.1 Les optimisations du quartier de stockage HA

Les optimisations étudiées dans un but technico-économique et de sûreté concernent (i) le conteneur de stockage (cf. Chapitre 3.1.3 du présent document), (ii) la conception de l'alvéole ou bien (iii) la conception du quartier de stockage HA. Ces optimisations portent sur la géométrie, les dimensionnements, les matériaux ou bien les méthodes de creusement. Elles contribuent principalement à une optimisation technico-économique du composant vis-à-vis de sa réalisation ou de son fonctionnement.

Concernant les alvéoles du quartier de stockage HA, les optimisations envisagées concernent principalement l'augmentation de leur longueur au-delà de 150 mètres et l'utilisation de nouveaux matériaux (en substitution de l'acier) pour le chemisage.

Concernant la longueur de l'alvéole, un essai est ainsi prévu au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, qui pourra être conforté par la réalisation d'un démonstrateur au sein de l'installation nucléaire Cigéo, soit en zone de soutien logistique-travaux soit dans une extension du quartier pilote HA.

Les optimisations éventuelles concernant les nouveaux matériaux portent principalement sur l'utilisation de matériaux non métalliques pour le chemisage (à ce stade, principalement des géopolymères, voire des composites à matrice céramique (CMC)) en remplacement de l'acier. Par nature, ces matériaux permettent en particulier de diminuer significativement la production d'hydrogène par corrosion anoxique des alvéoles HA (cf. Chapitre 3.1.3 du présent document).

Les essais prévus visent à poursuivre les recherches sur les procédés de fabrication de géopolymères et de structures sandwich (céramique/CMC) pour le chemisage. Différents essais de faisabilité et d'étude de performance sont prévus à petite échelle avant, s'il y a lieu, la réalisation au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne d'un essai d'alvéole équipé de tels chemisages.

Concernant le quartier de stockage HA, la principale optimisation envisagée est l'utilisation de tunneliers rétractables pour le creusement de ses galeries d'accès et de liaison. Cette optimisation s'appuiera sur les études d'optimisation prévues pour le creusement des alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.7.5 du présent document).

3.3.3.2 Les évolutions possibles du concept d'alvéole HA

Compte tenu de l'échéance éloignée de la mise en service du quartier de stockage HA, en lien avec la poursuite des développements technologiques et de l'acquisition de connaissance, des évolutions de concepts différents de celui porté à la demande d'autorisation de création sont étudiées.

Les principales évolutions possibles de concept d'alvéole HA identifiées à ce jour concernent un alvéole débouchant et ventilé, voire un alvéole descendant ennoyé, sans préjuger d'autres évolutions de concept.

L'alvéole débouchant ventilé est un micro-tunnel horizontal du même type que celui du concept porté à la demande d'autorisation de création allongé (300 mètres), joignant deux galeries et étant ventilé, ce qui par nature permettrait une gestion simple de la composition de l'atmosphère interne de l'alvéole. L'exigence relative à la borgnitude est alors reportée à l'échelle du quartier.

L'alvéole descendant ennoyé est un micro-tunnel descendant rempli d'eau afin de placer le conteneur et le chemisage dans un environnement anoxique favorable à de faibles cinétiques de corrosion. Un premier essai de creusement pour une longueur limitée (40 m) a déjà été réalisé avec succès au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne avec une pente descendante de 10 %.

Ces évolutions font d'abord l'objet d'études de conception, de comportement et de faisabilité, en intégrant la conception du quartier de stockage HA, afin de s'assurer de la capacité de son déploiement progressif, et ensuite, en fonction des résultats, d'essais à échelle représentative, notamment au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ou dans l'installation souterraine, par exemple dans la zone de soutien logistique-travaux ou bien dans une extension du quartier pilote HA.

3.4 Les alvéoles MA-VL des tranches ultérieures

3.4.1 La démarche progressive de développement et de qualification de réalisation et de fonctionnement des nouveaux alvéoles MA-VL

3.4.1.1 Les alvéoles MA-VL des tranches ultérieures

Suite à la réalisation puis à la mise en service de la tranche 1 du quartier de stockage MA-VL, et si la décision du Parlement est de poursuivre le stockage, éventuellement en modifiant la conception ou les conditions d'exploitation, de nouveaux ouvrages pourront être construits pour recevoir et stocker les colis MA-VL existants (cf. Figure 3-6).

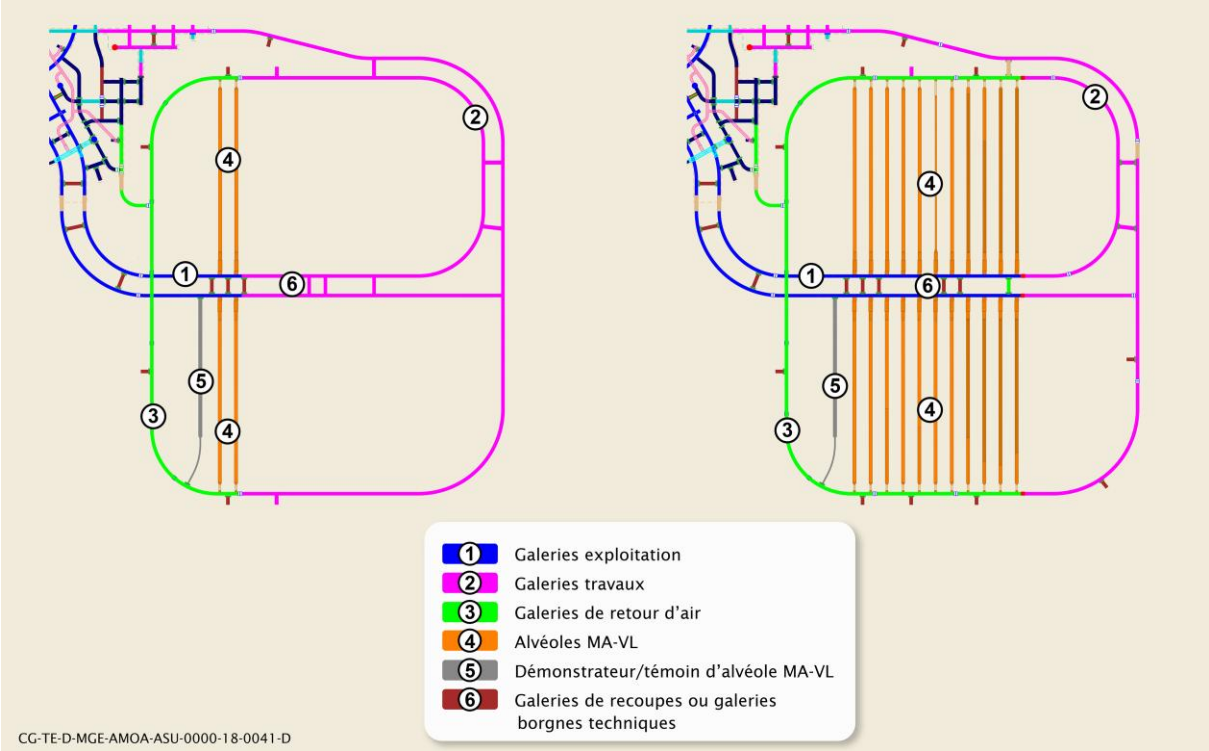


Figure 3-6 *Plan général du quartier de stockage MA-VL en tranche 1 (à gauche) et illustration à terminaison (à droite), avec les différents ouvrages*

Le mode de stockage des autres déchets MA-VL pourrait évoluer par rapport aux prévisions initiales. Cet enjeu est particulièrement sensible pour les déchets en attente de conditionnement. Ces questions seront instruites au regard du retour d'expérience de l'exploitation de l'INB et des résultats issus de la poursuite des études et recherches en matière de gestion des déchets radioactifs.

Ces nouveaux ouvrages constituent les tranches ultérieures à la tranche 1 du quartier de stockage MA-VL (cf. Encadré suivant).

LES TRANCHES ULTÉRIEURES DU QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL

Le quartier de stockage MA-VL est organisé autour d'une ossature de galeries de liaison et de retour d'air, à partir de laquelle les alvéoles MA-VL seront progressivement construits. Il est composé d'une vingtaine d'alvéoles distants d'une cinquantaine de mètres.

Les géométries globales des alvéoles des tranches ultérieures sont similaires à celles des alvéoles de la tranche 1. Leur génie civil secondaire est cependant adapté aux familles de colis qui y seront stockées. Les éléments permettant le fonctionnement des alvéoles seront également similaires à ceux utilisés pour les ouvrages de la tranche 1 (pont stockeur, façade d'accostage, etc.).

L'alvéole prévu pour recevoir les colis de stockage de type CS6 présente une géométrie spécifique avec un diamètre excavé réduit en partie utile par rapport à celui des autres alvéoles de l'ordre de 3 mètres à 4 mètres du fait des spécificités de ce colis de stockage ne pouvant être empilé ainsi qu'un aménagement de la cellule de manutention spécifique pour permettre le transfert des colis par un chariot stockeur.

Outre la poursuite de la mise en stockage de familles de colis déjà prises en compte dans les quatre premiers alvéoles MA-VL, ces nouveaux alvéoles MA-VL prendront en charge de nouvelles familles. De la même façon que pour les alvéoles de stockage MA-VL de la tranche 1 et selon les familles concernées, cette prise en charge pourra être faite soit par un stockage en conteneur soit par stockage direct. Dans le cadre de ce plan de développement de l'installation nucléaire Cigéo, seul l'inventaire de référence est considéré avec ses modalités de stockage (nombre de colis, chroniques, modes de conditionnement, modes de stockage, etc.) décrits dans le dossier de demande d'autorisation de création.

Les études concernant la conception du quartier de stockage MA-VL au regard de sa flexibilité (cf. Encadré ci-dessous) vis-à-vis des modes de conditionnement, de modes de gestion (*e.g.* les colis de déchets bitumés) ou des modalités de stockage (stockage direct ou en conteneur) sont couvertes par les études décrites ci-dessus.

Les études relatives à la flexibilité à une évolution de l'inventaire de référence s'inscrivent dans le cadre des études sur les inventaires de réserve (cf. Chapitre 5 du présent document).

LA GESTION DE LA FLEXIBILITÉ ET LES ÉVOLUTIONS DE CONCEPTION DU QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL

La conception de l'installation nucléaire Cigéo, l'établissement de son domaine de fonctionnement et la démonstration de sûreté associée sont menés sur la base de données d'entrées et d'hypothèses sur les colis MA-VL de l'inventaire de référence (nombre de colis, chroniques, modes de conditionnement, modes de stockage, etc.) retenues au stade du dossier de demande d'autorisation de création.

Dans les limites définies par la flexibilité, le nombre d'alvéoles MA-VL à construire pourrait être révisé, en particulier en cas de modification des modalités de mise en stockage (en conteneur *vs* stockage direct).

D'une façon générale, pour les familles éligibles à ces deux modalités de mise en stockage, c'est le processus d'acceptation (cf. Chapitre 1.4.6 du présent document) qui fige progressivement la configuration. Toutefois, les possibilités de mise en œuvre de cette flexibilité diminuent au fur et à mesure de l'exploitation de l'installation avec la diminution de la disponibilité des alvéoles selon leur réalisation et leur remplissage. Ainsi, même si un colis est éligible au stockage direct, il pourra être mis en conteneur de stockage si l'alvéole dédié au stockage direct pouvant le concerner est plein alors que celui pour les colis de stockage est incomplet.

Concernant les autres familles de colis ne pouvant être prises en compte dans l'installation nucléaire Cigéo que selon un seul mode de stockage, les principaux critères d'allocation des familles de colis par alvéole sont leurs compatibilités géométriques et physico-chimiques. De ce fait, en fonction des prévisions de livraison périodiquement révisées, le schéma d'allocation des colis par alvéole peut être aussi révisé.

Pour certaines familles de déchets non encore conditionnées ou non encore produites (certains déchets étant issus d'opérations futures de démantèlement par exemple), des hypothèses de conditionnement et donc de mise en stockage sont retenues dans le dossier de demande d'autorisation de création. Si des évolutions surviennent, la conception actuelle de l'installation permet soit d'exploiter sans modification, soit de procéder à des évolutions mineures des équipements et modes d'exploitation (outils de préhension, contrôles, rééquipements ponctuels, etc.).

3.4.1.2 La prise en compte des retours d'expérience

Les nouveaux alvéoles MA-VL seront réalisés environ une dizaine d'années après le démarrage de la construction des quatre premiers alvéoles MA-VL. La construction, le raccordement et la mise en service de ces nouveaux alvéoles, puis ceux des tranches ultérieures, prennent en compte les retours d'expérience issus de la construction, de la mise en service et du fonctionnement des alvéoles de la tranche 1 ainsi que des connaissances techniques et scientifiques acquises, en particulier au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse-Haute-Marne, d'ici là. La réalisation de ces alvéoles intègrera également les acquis concernant les dispositifs de surveillance.

Les étapes progressives permettant d'aboutir à la mise en service de ces nouveaux alvéoles s'inscrivent dans la continuité de celles menées au cours de la phase industrielle pilote pour les alvéoles de la tranche 1, en particulier du fait de géométries et de modalités de mise en stockage similaires.

Il est à noter que le démarrage de la construction des alvéoles MA-VL de la tranche postérieure à la tranche 1 au moment de la mise en exploitation des quatre premiers alvéoles entraîne une coactivité dans le quartier de stockage MA-VL entre les activités de stockage dans les alvéoles de la tranche 1 et les activités de travaux des alvéoles de la tranche suivante.

Dans le cadre des études d'avant-projet, il a été démontré la faisabilité d'une transition vers une tranche ultérieure et identifié les impacts en termes de planning pour la prise en compte des mesures conservatoires adéquates dans la conception de la tranche 1.

Les modalités de basculement entre la partie en exploitation et la partie en travaux du quartier de stockage MA-VL pourront être optimisées afin d'améliorer le fonctionnement global du quartier (coactivité, sécurité, identification et impact des arrêts d'exploitation, etc.). Cette optimisation s'effectuera au travers du développement d'outils numériques de représentation en 3D du quartier et de son fonctionnement. La première étude sera effectuée avant la réalisation de la tranche 1 afin d'optimiser les étapes de basculement vers la tranche suivante.

Par la suite, les modalités d'exploitation de ces nouveaux alvéoles intègreront le retour d'expérience acquis sur les premiers réalisés en particulier sur les équipements du process nucléaire, qui sera un peu plus faible en termes de durée que pour la construction du génie civil mais pourra être valorisé rapidement en termes de fonctionnalité et de maintenance par exemple.

La démarche générale de mise en œuvre des essais pour la préparation à la mise en service de ces alvéoles est semblable à celle mise en œuvre pour celle des alvéoles de la tranche 1 (cf. Chapitre 2.7.3 du présent document).

En effet, après l'autorisation de mise en service de l'installation nucléaire Cigéo et en particulier celle de la tranche 1 du quartier de stockage MA-VL, l'exploitant procède de la même façon pour les tranches suivantes avec la réalisation des essais et les vérifications des procédures d'exploitation en conditions non actives, puis, après l'autorisation de la mise en service de chacune des tranches ultérieures du quartier de stockage MA-VL, la réalisation des essais en actif (cf. Chapitre 1.2 du présent document) et la vérification du fonctionnement des équipements lors des opérations de stockage et de retrait de vrais colis dans l'alvéole et la validation des procédures d'exploitation et de maintenance.

Concernant les colis de déchets, les mêmes procédures d'acceptation dans l'installation nucléaire de stockage que celles appliquées aux familles de colis reçus dans les quatre premiers alvéoles sont appliquées (cf. Chapitre 1.4.6 du présent document).

3.4.2 Le maintien d'une acquisition continue des connaissances

Parmi les familles de déchets prévues pour les tranches ultérieures à la tranche 1, certaines appartiennent à des catégories physico-chimiques différentes de celles prévues en tranche 1. C'est le cas des familles de déchets bitumés (cf. Chapitre 3.1.3 du présent document) mais également des familles de déchets salins.

Ces familles de déchets MA-VL contiennent des sels (*e.g.* nitrates) dont le relâchement peut intrinsèquement conduire à une évolution des conditions de force ionique dans les alvéoles et dans le Callovo-Oxfordien en champ proche. En effet, l'augmentation de la concentration en nitrates en solution entraîne une modification de la force ionique susceptible de modifier la solubilité de certaines phases minérales cimentaires, de modifier les conditions de transfert des solutés dans le Callovo-Oxfordien ainsi que leurs propriétés de rétention (*e.g.* les solutés sensibles aux processus d'échange d'ions (alcalins et alcalino-terreux)). Ces effets ont été retenus de manière prudente dans les évaluations de sûreté après fermeture portées au dossier de demande d'autorisation de création.

Ainsi, en complément de la poursuite d'une démarche d'acquisition continue au regard des effets des matériaux cimentaires (cf. Chapitre 2.7.4.3 du présent document) et des produits organiques de dégradation relâchés par les colis de déchets MA-VL (cf. Chapitre 2.2.2.3 du présent document) sur le transfert des radionucléides et de substances toxiques chimiques, celle relative aux effets des sels relâchés par les colis de déchets MA-VL participe également à conforter et quantifier de manière plus précise les marges retenues dans les évaluations de sûreté portées au dossier de demande d'autorisation de création.

3.5 L'organisation temporelle prévisionnelle des actions

Ce chapitre reprend les actions détaillées ci-avant sous forme d'un logigramme indiquant leur enchaînement afin de donner une vision intégrée en lien avec le déploiement de l'installation nucléaire Cigéo jusqu'à l'autorisation de fermeture du quartier de stockage HA (cf. Figure 3-7) et du quartier de stockage MA-VL (cf. Figure 3-8).

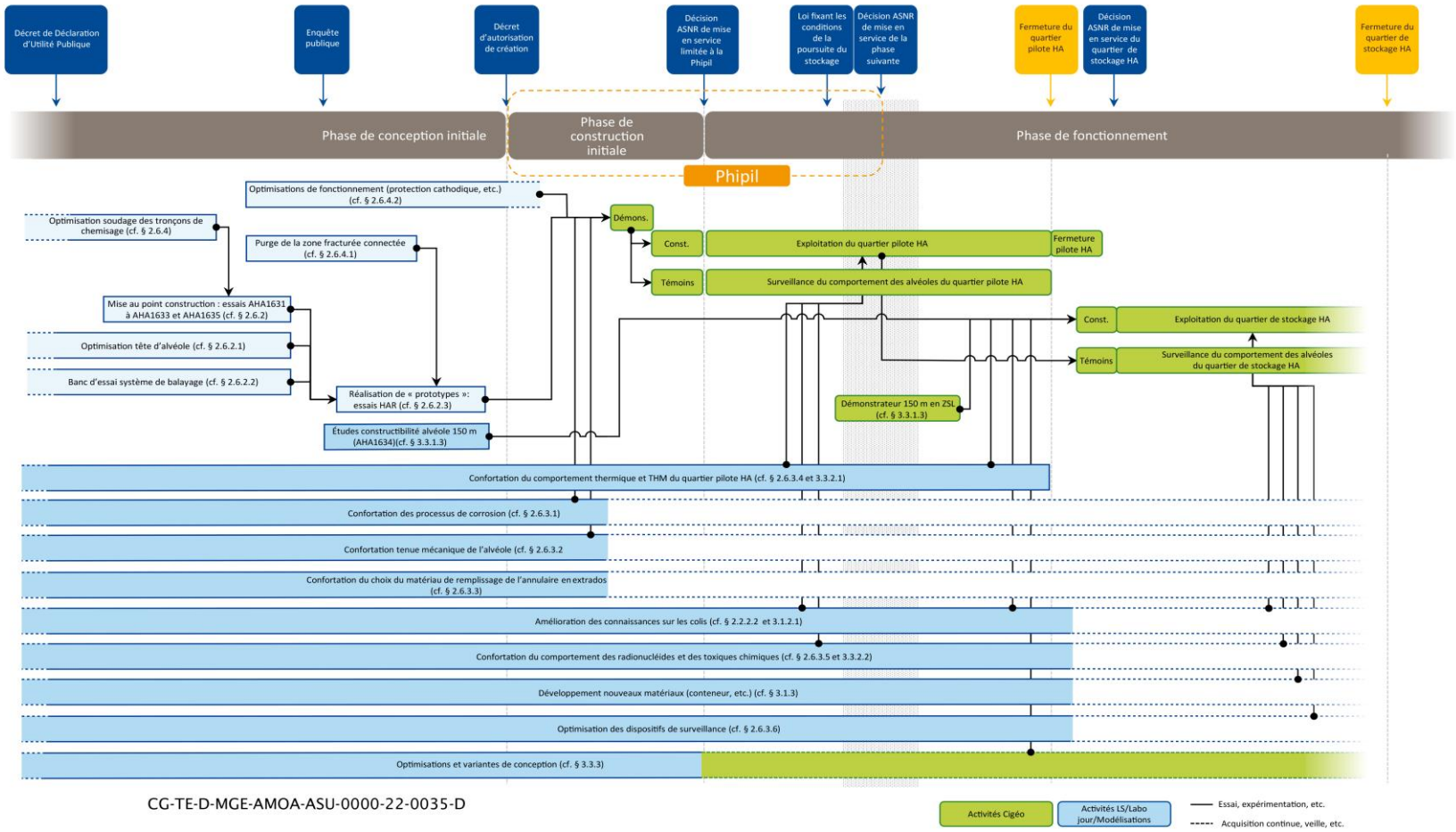


Figure 3-7 *Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives au quartier de stockage HA. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions. (* : la Phipil prend fin avec la décision de l'ASNR sur la mise en service suivante. Elle pourra inclure la construction et/ou l'exploitation de la T2)*

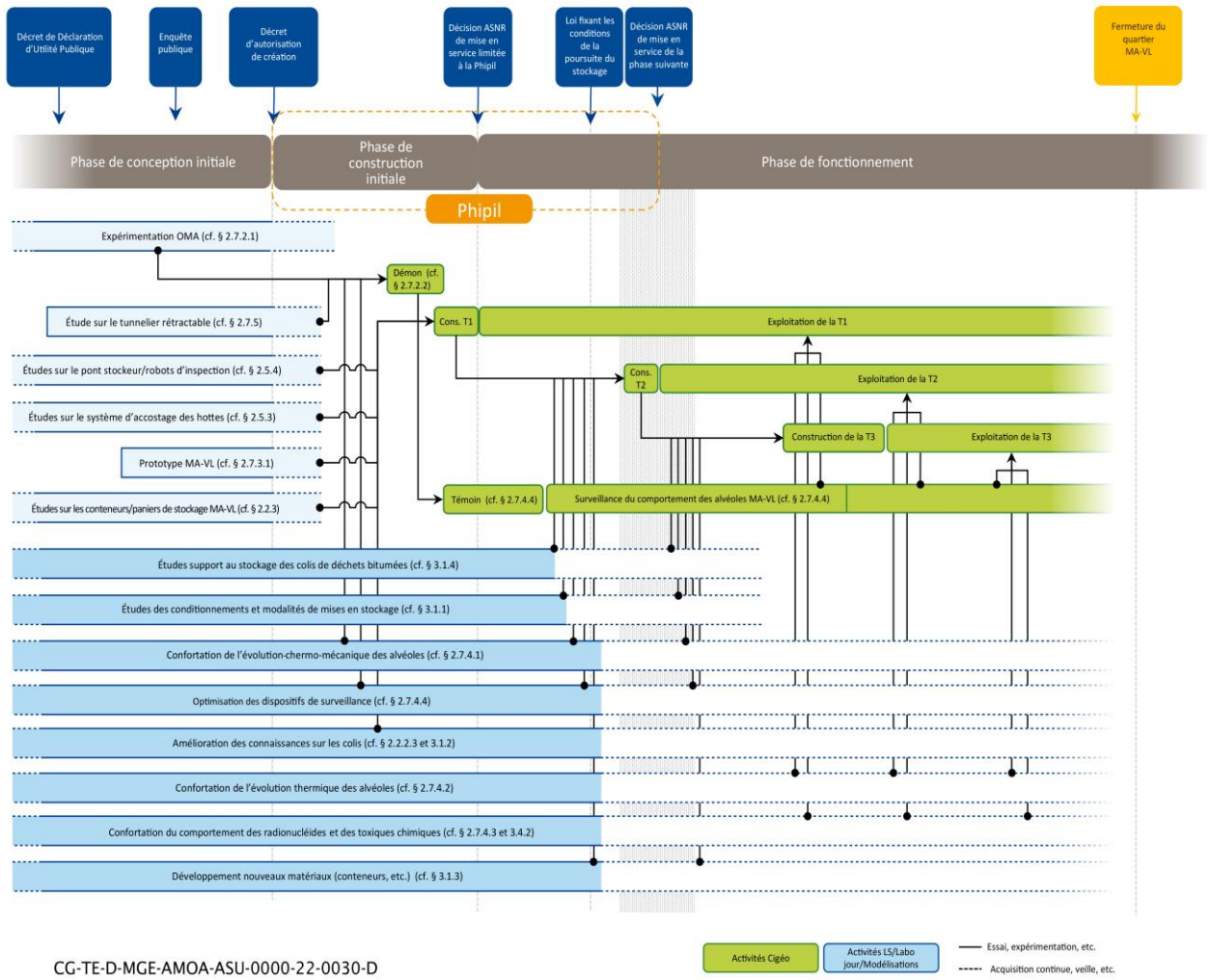


Figure 3-8 *Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives aux tranches ultérieures du quartier de stockage MA-VL Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions. (* : la Phipil prend fin avec la décision de l'ASNR sur la mise en service suivante. Elle pourra inclure la construction et/ou l'exploitation de la T2)*

4

La préparation de la fermeture

4.1 La temporalité spécifique des ouvrages de fermeture 171
4.2 La logique de déroulement et la nature des activités 174
4.3 L'organisation temporelle des actions 190

Pour garantir la mise en sécurité des déchets stockés sur de très longues périodes de temps, les ouvrages souterrains doivent être fermés (cf. Figure 4-1). Les opérations de fermeture permettent d'avancer progressivement vers un fonctionnement passif de l'installation (cf. Encadré ci-dessous).

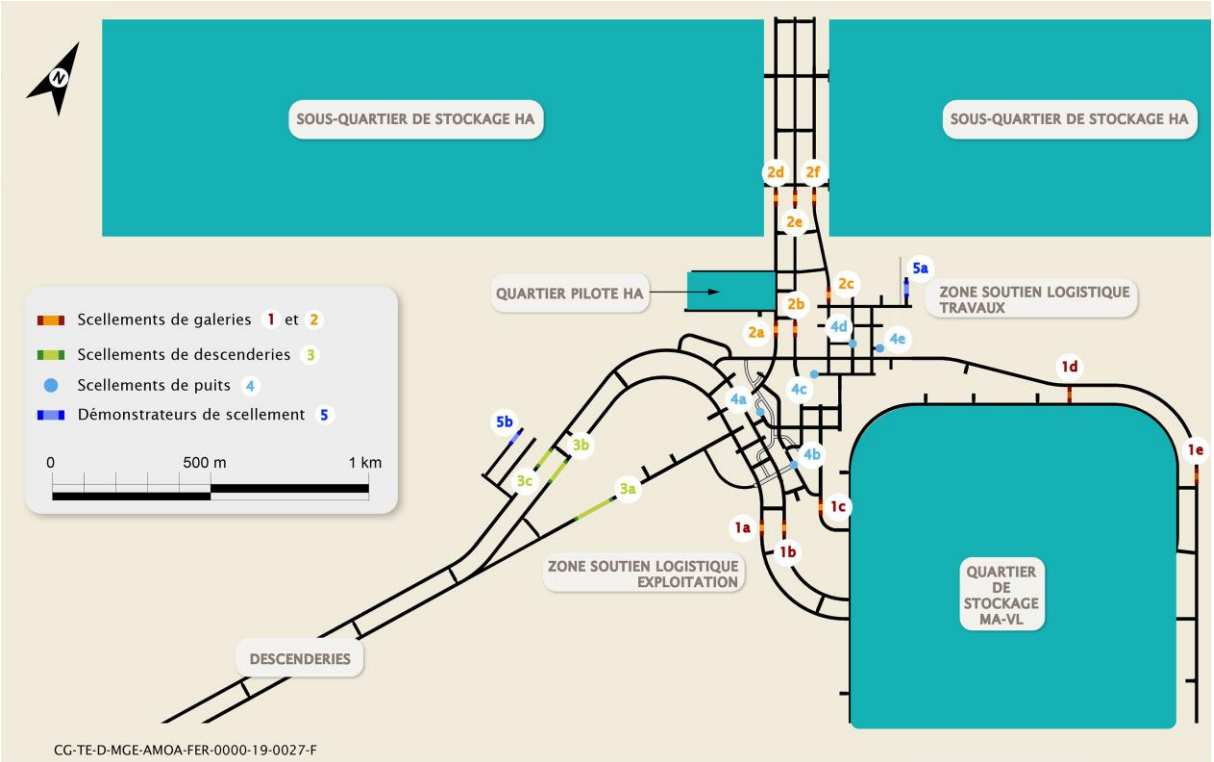


Figure 4-1 Illustration de la localisation des scellements

LES ÉTAPES DE FERMETURE

En pratique, les opérations menées en vue de la fermeture consistent :

- dans un premier temps à démonter des équipements d'exploitation qui n'ont pas vocation à être conservés en place dans le stockage, soit parce qu'ils sont valorisables pour d'autres activités (équipements, matériaux, etc.), soit parce que leur quantité, leur nature ou leur géométrie pourraient être préjudiciables à la sûreté à long terme (production de gaz, de complexants, création de chemins préférentiels de transfert, etc.). Ces opérations s'apparentent à des opérations de démantèlement préalables aux opérations de fermeture ;
- dans un deuxième temps, à la construction progressive d'ouvrages, complémentaires de la barrière géologique, dont la fonction est d'assurer le bon fonctionnement passif du stockage à très long terme et de préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien. Les alvéoles d'un quartier de stockage sont obturés, ses galeries sont remblayées, le quartier est fermé et, le cas échéant, scellé ;
- en dernier lieu, à procéder à la fermeture définitive, c'est-à-dire au scellement et au remblayage des accès au stockage depuis la surface (puits et descenderies).

Les modalités de fermeture sont présentées dans la pièce 13 - Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance (11).

L'architecture de stockage est ainsi conçue de manière à limiter les écoulements d'eau en son sein en après fermeture sur le long terme en mobilisant les propriétés favorables de la couche de Callovo-Oxfordien (faible perméabilité et faible gradient hydraulique). Les ouvrages de fermeture complètent le dispositif de confinement que constitue cette couche :

- en évitant le court-circuit de cette dernière par les ouvrages, plus particulièrement les ouvrages de liaison surface-fond (y compris par la zone de Callovo-Oxfordien endommagée au voisinage immédiat de l'excavation lors du creusement) assurant ainsi la « fermeture hydraulique » du système de stockage ;
- en contribuant à empêcher l'endommagement mécanique à long terme sous l'effet de la production de gaz ou lorsque le revêtement, du fait de sa dégradation, n'est plus en mesure d'assurer la stabilité des ouvrages souterrains.

Comme l'ensemble des différents composants de l'installation nucléaire Cigéo, le développement des ouvrages de fermeture suit un développement progressif aboutissant pour ce qui concerne ces ouvrages à leur mise en place suite à l'obtention de l'autorisation de fermeture (cf. Encadré ci-dessous).

LES OUVRAGES DE FERMETURE

Dans l'objectif de protection de l'homme et l'environnement et en accord avec les principes du guide de sûreté de l'ASN (19), l'Andra s'est attachée à étudier les ouvrages de fermeture dès le début de la conception. Ceux-ci doivent en effet apporter une fonction de limitation des flux hydrauliques (et des vitesses de circulation de l'eau par la « voie ouvrages »). Cette limitation de flux participe à favoriser le transfert des radionucléides et des substances chimiques dans le Callovo-Oxfordien au droit du réseau des ouvrages souterrains (*i.e.* Préservation de la dominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien). La présence de ces ouvrages permet également de préserver la couche de Callovo-Oxfordien.

Ces principes ont orienté les choix de conception des ouvrages de fermeture à travers deux types d'ouvrages avec des fonctions différentes :

- les remblais pour limiter l'endommagement de la roche à long terme afin de préserver des épaisseurs de garde importante au droit du stockage et maintenir les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien. Le remblai est constitué des argilites excavées (issues du creusement et entreposées en verse) additionnées, le cas échéant, de constituants (*e.g.* sable) permettant d'en ajuster les caractéristiques pour favoriser la maîtrise de sa fonction ou de sa mise en place en cherchant notamment à minimiser les taux de vide résiduels ;
- les scellements (cf. Figure 4-2 et figure 4-3), composants importants pour la protection des intérêts, qui partagent la même fonction que les remblais avec en complément une fonction de limitation des écoulements d'eau par les ouvrages (*i.e.* résistance hydraulique). Par ailleurs, les scellements doivent aussi faciliter le transfert de l'hydrogène afin de contribuer à limiter la pression maximale de gaz au sein du stockage durant la période transitoire préalable à la resaturation totale du stockage. Le principe général de conception des différents scellements est identique que l'on considère un scellement de puits, un scellement de descenderie ou un scellement de galerie de liaison et consiste en :
  - ✓ un noyau à base d'argile gonflante (bentonite) additionné, le cas échéant, de matériaux destinés à en ajuster les propriétés (densité, pression de gonflement, pression d'entrée de gaz, etc.) et faciliter sa fabrication (poudre, pellets, briques). Pour garantir l'atteinte de la performance hydraulique spécifiée, le contact direct[36] entre la roche et le noyau argileux peut être obtenu par des déposes du revêtement permettant un contact noyau/Callovo-Oxfordien : le choix de l'argile gonflante assure ainsi une adhérence du noyau avec la roche, empêchant que l'interface entre le noyau et la roche soit une voie privilégiée d'écoulement de l'eau :
    - dans les galeries de liaison, le revêtement/soutènement au droit du noyau de scellement est déposé localement (longueur d'environ 1 mètre à 2 mètres), éventuellement (variante) complété par des coupures hydrauliques (saignées radiales creusées dans le Callovo-Oxfordien en champ proche) interceptant la zone fracturée connectée ;

[36] La performance hydraulique d'un scellement (faible perméabilité longitudinale en grand) est déterminée par la zone de contact entre le noyau (de faible perméabilité) et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche.

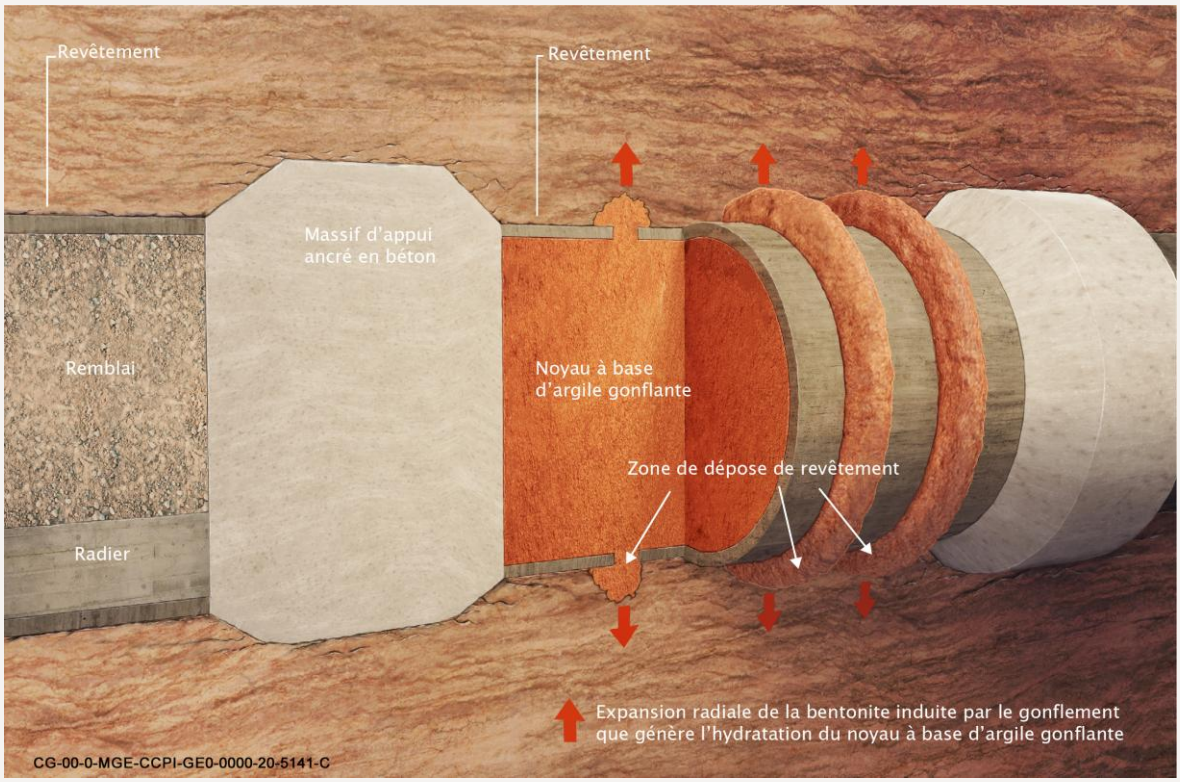


Figure 4-2 *Schéma de principe illustratif d'un scellement de galerie (solution technique de référence avec massifs d'appui en béton)*

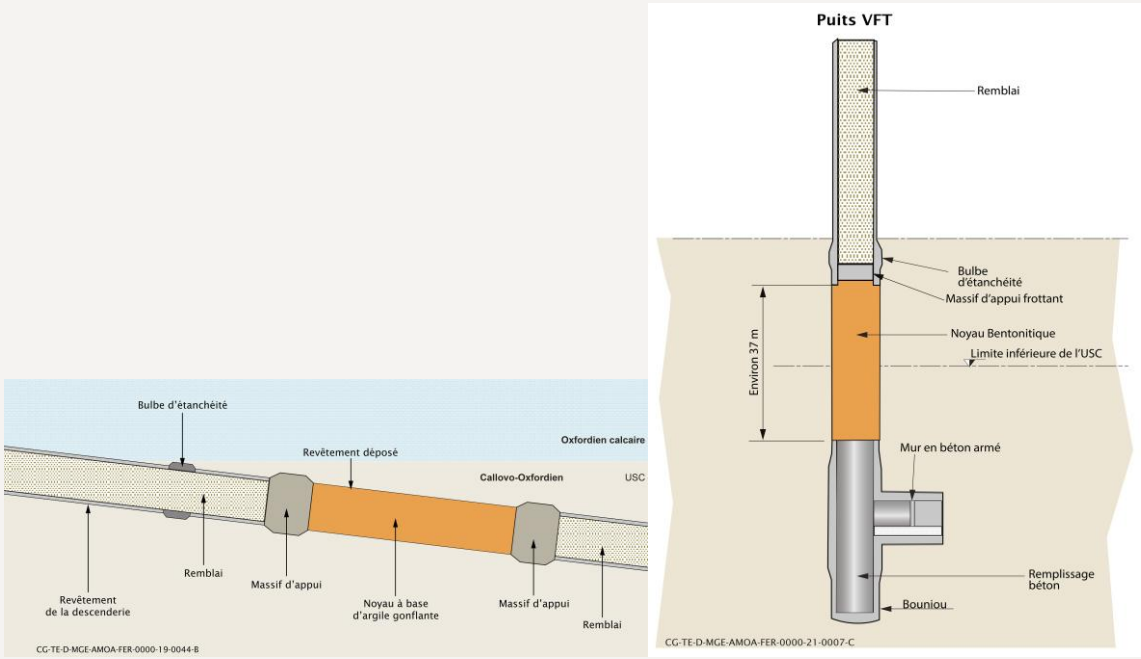


Figure 4-3 *Schémas de principe illustratif de scellement de liaison surface-fond (à gauche : scellement de descenderie ; à droite : scellement du puits travaux personnel, ventilation air frais (VFT)*

- dans les liaisons surface-fond, les caractéristiques mécaniques de l'unité silto-carbonatée (USC) du Callovo-Oxfordien et l'absence d'endommagement permettent une dépose sur toute la hauteur disponible de l'USC (avec une purge de la roche en tant que de besoin) ;

- ✓ un dispositif de confinement mécanique du noyau favorisant en tant que de besoin la pression de gonflement du noyau, pour notamment contribuer à fermer hydrauliquement l'interface avec le Callovo-Oxfordien. Ce dispositif de confinement est composé :
  - pour les scellements des descenderies par des massifs d'appui en béton ancrés dans l'USC ;
  - pour les scellements des puits par un massif d'appui en béton non ancré frottant ;
  - pour les scellements de galerie par des massifs d'appui en béton ancrés dans l'UA pour la solution de référence.

Ce chapitre a ainsi pour objet de présenter les actions permettant de répondre aux enjeux de démonstration de sûreté qui seront à apporter en vue de la demande d'autorisation de fermeture (cf. Article R.593.75 du code de l'environnement[37]). Il s'agit tout d'abord de mettre en évidence leur spécificité au regard de leur temporalité de mise en œuvre (cf. Chapitre 4.1 du présent document) et, dans un second temps, de présenter les études support à leur conception, à la confortation de leur constructibilité et à la qualification de leur fonctionnement (cf. Chapitre 4.2 du présent document).

La dernière partie de ce chapitre (cf. Chapitre 4.3 du présent document) présente l'organisation programmatique des actions déjà en cours ou prévues d'être réalisées au cours des phases de déploiement de l'installation nucléaire Cigéo, en vue de pouvoir apporter les éléments nécessaires à la réalisation des ouvrages de fermeture.

4.1 La temporalité spécifique des ouvrages de fermeture

Le dossier de demande d'autorisation de création présente les éléments de la définition préliminaire des ouvrages de fermeture vis-à-vis de leurs spécifications. Ce dossier vise ainsi à fournir les éléments probants de justification des grands principes et des options de conception et à présenter une ou des solution(s) technique(s) qui peut(vent) y répondre à ce stade des connaissances scientifiques et technologiques et en lien avec les fonctions et exigences de sûreté (cf. Chapitre 4.1.1 du présent document). Il vise également à montrer qu'il n'existe pas d'élément rédhibitoire quant à leur mise en œuvre, ni d'incompatibilité entre les modes de réalisation prévus pour la réalisation des ouvrages de liaison, qui se feront dès la phase de construction initiale (cf. Chapitre 4.1.2 du présent document), et les modes de fermeture et de scellement tels qu'envisagés à ce stade, bien que l'échéance de leur réalisation soit lointaine (cf. Chapitre 4.1.3 du présent document).

[37] L'article R. 593-75 du code de l'environnement mentionne notamment que le dossier comprendra « *La description des ouvrages mis en place en vue de la fermeture ; La description des différentes étapes des travaux nécessaires à la réalisation de l'ensemble des opérations préparatoires à la fermeture ainsi que des travaux de fermeture puis de surveillance, en justifiant leurs durées respectives ; la version préliminaire de la révision du rapport de sûreté mentionnée au 8° du I de l'article R. 593-67 porte, d'une part, sur la sûreté de réalisation des opérations de démantèlement, y compris la fermeture de l'installation, et de surveillance et, d'autre part, sur la sûreté à long terme du stockage des déchets...* ».

4.1.1 Une perspective de mise en œuvre des ouvrages de fermeture lointaine qui invite à ne pas figer aujourd'hui les solutions techniques

En regard du développement progressif de l'installation nucléaire Cigéo et de la date lointaine de réalisation des scellements de l'installation souterraine, différentes solutions techniques de ces scellements sont envisagées à ce stade laissant ainsi ouvertes les solutions qui seront retenues *in fine* et permettant de bénéficier :

- des progrès scientifiques et technologiques disponibles au moment de la réalisation de ces ouvrages (expérimentation au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, sans préjuger de la poursuite de son exploitation durant toute la période de fonctionnement Cigéo, démonstrateurs dans l'installation souterraine, etc.) ;
- de l'expérience acquise lors de l'exploitation de l'installation souterraine en particulier le retour d'expérience de la surveillance des ouvrages dans lesquels seront placés les scellements en environnement réel.

Les options de conception dans la demande d'autorisation de création visent donc à donner un éclairage sur des solutions possibles, en soulignant l'absence d'élément rédhibitoire quant à leur mise en œuvre ni d'incompatibilité quant à la réalisation future de ces ouvrages et l'atteinte des performances visées.

Le choix technique détaillé interviendra dans la temporalité précédant la réalisation des premiers scellements dans l'installation nucléaire Cigéo, selon la stratégie de fermeture qui sera retenue et dont une proposition est présentée dans la pièce 16 - Plan directeur de l'exploitation (2) et les modalités présentées dans la pièce 13 - Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance (11) (cf. Encadré ci-dessous).

LA STRATÉGIE DE FERMETURE

L'installation nucléaire Cigéo est conçue pour que les opérations visant à progresser vers la fermeture définitive de l'installation souterraine puissent être engagées sur sa période de fonctionnement ou reportées à la phase de démantèlement et de fermeture. La flexibilité de l'exploitation permet aux générations futures de modifier le phasage des opérations de fermeture. En effet, les colis de déchets, les conteneurs et les infrastructures souterraines sont dimensionnés pour que le calendrier d'obturation des alvéoles et de fermeture des quartiers puisse être retardé ou avancé, sans préjudice pour la sûreté.

Les générations futures pourront ainsi adapter les opérations de fermeture à leurs contraintes (vitesse de remplissage plus ou moins rapide, etc.) et aux décisions de politiques nationales relatives à l'inventaire (quartiers plus ou moins grands, etc.). Elles pourront avancer progressivement vers une sûreté plus passive ou au contraire choisir de préserver une récupérabilité plus aisée, en particulier si des pistes alternatives au stockage réalistes venaient un jour à se concrétiser.

4.1.2 Des mesures conservatoires dès la phase de construction initiale qui n'obèrent pas les possibilités de réalisation future des ouvrages de fermeture

Conformément à la stratégie de fermeture, la mise en place des scellements en particulier des scellements des puits et descenderies sera réalisée au-delà de 2100. Si, à ce stade, cette mise en œuvre des opérations industrielles de fermeture apparaît lointaine, il est néanmoins nécessaire de vérifier que les choix arrêtés pour les premières tranches de réalisation n'obèrent pas les possibilités de réalisation future des ouvrages de fermeture quelle(s) que soi(en)t la (ou les) solution(s) qui sera(ont) retenue(s) et mise(s) en œuvre à cette échéance.

Ainsi, la conception de l'installation nucléaire Cigéo retenue au stade du dossier de demande d'autorisation de création inclut des mesures conservatoires prises dès la conception initiale et mises en œuvre dès la phase de construction initiale des ouvrages souterrains puis lors des constructions ultérieures pendant la phase de fonctionnement qui permettent de préserver les capacités de réalisation futures et de performance des ouvrages de fermeture. Cela se traduit par :

- des dispositions de préservation et de surveillance des verses constitutives des futurs remblais (cf. Encadré au chapitre 2.3.3 du présent document). Il s'agit de laisser la possibilité de remanier à façon les argilites excavées en limitant des manipulations irréversibles (ajout de matériaux) au moment de leur stockage en verse et en respectant les exigences assignées aux remblais ;
- des portions de galeries réservées pour l'implantation future de scellement :
  - ✓ avec des longueurs suffisantes pour l'implantation ultérieurement des scellements, quels que soient les concepts qui seront *in fine* retenus au moment de leur réalisation, et, quoi qu'il en soit, supérieures au strict besoin ;
  - ✓ orientées dans la direction la plus favorable vis-à-vis de considérations de sécurité en phase chantier et de performance du système de stockage (maximisation des épaisseurs de garde saine verticale du Callovo-Oxfordien) ;
  - ✓ avec une géométrie (quasi-)circulaire évitant les concentrations de contraintes et fiabilisant l'estimation de l'extension des zones endommagées ;
- des options de conception des ouvrages de fermeture qui restent ouvertes pour laisser la possibilité de valoriser les progrès scientifiques et technologiques en lien avec les meilleures techniques disponibles à l'horizon de la réalisation de ces ouvrages et ne pas dépendre de filière d'approvisionnement de matériaux ;
- des dispositions de surveillance des ouvrages souterrains en particulier le comportement des parties destinées à recevoir les scellements.

4.1.3 Des temps d'acquisition expérimentale longs qui invitent à anticiper les essais permettant de préparer la réalisation future

La logique de déploiement de l'architecture souterraine (creusement, fonctionnement, extension, fermeture) conduit à une mise en œuvre des ouvrages de fermeture dans l'installation souterraine de l'installation nucléaire Cigéo avec une temporalité lointaine : plusieurs décennies pour les ouvrages de fermeture horizontaux et séculaire pour la fermeture des liaisons surface-fond (cf. Chapitre 4.1.1 du présent document). Cette temporalité laisse la possibilité de continuer à développer les meilleures techniques disponibles parmi plusieurs options en vue de la demande de fermeture sans figer dès la phase de construction initiale une seule solution.

La stratégie est ainsi d'engager un programme scientifique et technologique pour vérifier la mise en œuvre et la performance de gammes de solutions techniques étudiées en environnement représentatif en termes de dimensions caractéristiques et d'ouvrage souterrain.

Cette démarche se décline en particulier par la réalisation de démonstrateurs de scellements dès la phase industrielle pilote pour apporter les éléments permettant de conforter (i) la faisabilité technologique et (ii) l'atteinte des performances visées, d'emporter la conviction de la capacité à fermer l'installation et de répondre aux demandes des évaluateurs (47).

De plus, cette démarche permet de prendre en compte les durées d'acquisition expérimentales et de suivis très longues (typiquement de l'ordre de la décennie *a minima*) *via* un programme s'appuyant successivement sur des essais en conditions représentatives au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne puis en situation opérationnelle dans l'installation souterraine Cigéo avant d'engager la mise en œuvre en situation réelle.

4.2 La logique de déroulement et la nature des activités

Les spécificités présentées par les ouvrages de fermeture conduisent à une déclinaison des études permettant de conforter leur conception et leur constructibilité. Une partie de ces études a déjà débuté, en particulier au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Elles se poursuivent et sont complétées au cours de la phase de conception initiale du projet puis lors de la phase de construction initiale de l'installation nucléaire Cigéo (cf. Chapitre 4.2.1 du présent document).

Ces études ont également pour objet d'apporter progressivement les éléments de confortation de l'atteinte des performances de sûreté qui leur sont dévolues (cf. Chapitre 4.2.2 du présent document) en tant que composant important pour la protection.

Ces actions ont également pour objet de mener une veille sur les développements technologiques concourant à améliorer les concepts étudiés ainsi que sur les modalités de réalisation de ces ouvrages (cf. Chapitre 4.2.3 du présent document).

4.2.1 Le développement progressif de la construction et du fonctionnement des ouvrages de fermeture

D'une manière générale, la démonstration que les ouvrages de fermeture répondent aux fonctions, exigences et spécifications techniques qui leurs sont allouées dans un objectif de protection à long terme de l'homme et l'environnement s'établie suivant un enchaînement partant de la justification du bon fonctionnement « par partie » de chaque sous-composant de ces ouvrages jusqu'aux essais de fonctionnement plus intégrés (cf. Chapitre 1.2 du présent document).

La démonstration relative aux ouvrages de fermeture placés dans les ouvrages de liaison se décline ainsi au cours de la phase de conception initiale avec l'acquisition d'éléments permettant de conforter la démonstration de la constructibilité de ces ouvrages dans des conditions représentatives de celles attendues (cf. Chapitre 4.2.1.1 du présent document), puis, au cours de la phase de construction initiale, par la réalisation d'étude *in situ* (cf. Chapitre 4.2.1.2 du présent document). Par ailleurs, des études sont également menées au regard des éléments de confortation complémentaires à acquérir sur les modalités de fermeture de quartier pilote HA et des quartiers de stockage HA et MA-VL (cf. Chapitre 4.2.1.3 du présent document).

4.2.1.1 Conforter la constructibilité en conditions représentatives

La confortation de la constructibilité des ouvrages de fermeture demande à travailler sur trois thématiques interdépendantes en lien avec les fonctions des ouvrages :

- la mise en œuvre des matériaux et des ouvrages ;
- la nature et les domaines de caractéristiques physico-chimiques des matériaux constitutifs ;
- l'évolution phénoménologique, principalement thermique, hydraulique, mécanique et chimique, des ouvrages de fermeture en après fermeture et *in fine* leurs performances hydraulique-gaz et hydro-mécanique qui supportent leurs fonctions.

Ces trois thématiques ont fait l'objet de nombreux travaux depuis plus de 20 ans, de natures diverses : essais au jour, essais *in situ* dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne mais aussi dans d'autres Laboratoires souterrains, simulations numériques, analogues naturels (principalement pour les matériaux argileux) (cf. Encadré ci-dessous). Ces travaux ont été menés pour beaucoup dans le cadre de projets internationaux et notamment européens, en lien avec nos homologues étrangers et, plus particulièrement, la Nagra qui a défini des scellements similaires à ceux Cigéo.

LE SOCLE DE CONNAISSANCES SUR LES OUVRAGES DE FERMETURE

Au stade du dossier de demande d'autorisation de création, les éléments de démonstration de la faisabilité technologique de mise en place s'appuient notamment :

- pour les remblais, sur :
  - ✓ l'essai de remblayage réalisé en surface à Richwiller, qui a mis en évidence la faisabilité de la mise en place de remblais à base d'argilites seules ou mélangées avec du sable, avec en particulier un bon contact remblai-parois avec des vides limités (centimétriques) soulignant que les remblais sont peu sujets au tassement. Cet essai a montré également le maintien de la compacité des remblais après mise en place et deux ans de saturation ;
  - ✓ des essais réalisés sur échantillons en laboratoire jour, qui ont montré l'atteinte de densités sèches de mise en place élevées avec des formulations de remblai (jusqu'à 2 $g.cm^{-3}$) ;
  - ✓ des modélisations, qui montrent que, sur le long terme, la décharge limitée du Callovo-Oxfordien autour des ouvrages souterrains remblayés et la reprise des efforts par le remblai empêchent une réactivation des fractures discrètes et/ou connectées de la zone endommagée comme le souligne un essai de compression mécanique de la zone endommagée par le creusement réalisé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne montrant que la perméabilité du Callovo-Oxfordien endommagé mis en charge diminue pour tendre vers celle du Callovo-Oxfordien sain et que lors de la décharge, la perméabilité ne change pas et reste celle acquise lors de la mise en charge ;
- pour le noyau de scellement : sur l'important retour d'expérience quant à la mise en place de matériaux à base d'argile gonflante, notamment *in situ* dans des configurations proches ou identiques à celles attendues, en tant que barrière ouvragée autour des colis de déchets, de scellements ou de remblai.

  Différents types d'argile gonflante et différents modes de mise en forme (briques, pellets, par damage, par injection, etc.) et corrélativement de mise en place ont été testés seuls ou de manière combinée à échelle métrique à pluri-métrique, pour des volumes pouvant aller jusqu'à environ 725 m^3 pour l'essai de scellement FSS (*Full Scale Sealing*) en configuration horizontale (type galerie) ou verticale (type puits).

  Si ces travaux ont été conduits en grande partie en milieu granitique (mais néanmoins largement transposables), un effort considérable a été mené également en milieu argileux, à l'image de l'essai de scellement de galerie NSC (Noyau de SCellement à échelle ½ par rapport à Cigéo) à base de briques constituées d'un mélange bentonite/sable (40 %/60 %) compacté au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, de l'essai du projet européen RESEAL (48) à une échelle moindre, des essais de mise en place de pellets et de blocs pré-compactés d'argile gonflante (bentonite/sable 70 %/30 %) dans le cadre du projet européen ESDRED (49) et de pellets dans l'essai technologique FSS du projet européen DOPAS (50) (cf. Figure 4-4) ;
- pour le dispositif de confinement du noyau de scellement, sur :
  - ✓ l'essai TSX (*Tunnel Sealing eXperiment* au Laboratoire souterrain canadien de lac du Bonnet) (51) et les travaux du projet européen ESDRED qui valident la faisabilité de la mise en place de volumes de béton significatifs en configuration de galerie, avec une bonne interface avec la roche (ou le revêtement) et des caractéristiques mécaniques conformes à celles attendues et mesurées sur échantillon ;
  - ✓ l'essai FSS a par ailleurs montré la capacité de réaliser un massif d'appui en béton bas pH autoplaçant avec une maîtrise globale de la logistique des opérations de bétonnage depuis la centrale béton jusqu'à l'ouvrage (respect d'un temps d'attente de deux heures simulant l'approvisionnement sur l'INB), la maîtrise du pH, de la température d'hydratation, des déformations liées au retrait. L'homogénéité du monolithe était excellente, comme constatée lors de sa découpe de déconstruction, et le clavage du massif sur la paroi du tunnel était bon ;

- pour les saignées (variante) sur : la faisabilité technologique de la réalisation testée en surface et dans les Laboratoires de recherche souterrains du Mont-Terri avec l'expérimentation EZ-A et de Meuse/Haute-Marne au travers des expérimentations KEY (dispositif de clé d'ancrage), TSS (test de scellement et saignée) et SET (essai de remplissage de saignée).

  Ces essais ont permis de s'assurer de la possibilité de réaliser et remplir de telles saignées, ainsi que de vérifier leur efficacité pour interrompre la zone fracturée de la roche. En particulier, l'expérimentation KEY a démontré l'efficacité d'une saignée radiale de faible épaisseur (au radier d'une galerie) à couper la connectivité du réseau de fractures (cf. Figure 4-5). Cette expérimentation a permis également de mettre en évidence la caractéristique de l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien de s'auto-colmater progressivement grâce au gonflement des minéraux argileux smectites qu'elle contient.

Figure 4-4 *Photographie de l'essai de scellement de galerie FSS (Full Scale Sealing)*

Figure 4-5 *Photographie de l'essai Key de réalisation d'une saignée réalisé dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

En complément et dans la logique d'accroître le niveau de représentativité des essais dans les conditions industrielles d'un chantier souterrain et à une échelle représentative de celle attendue dans l'installation souterraine Cigéo, l'Andra prévoit la réalisation d'essais d'ouvrages de fermeture dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne :

- la mise en œuvre d'essais de remblai et de scellement de galerie (avec et sans massif d'appui) visant à conforter la faisabilité technologique en environnement représentatif pour différentes configurations et couvrant différentes gammes de formulations de matériaux ;
- la mise en œuvre d'un essai de dépose de voussoirs, visant à vérifier en conditions représentatives la capacité à réaliser la recette de la zone endommagée correspondante et l'atteinte des performances minimales requises de la zone endommagée.

Ces études pourront concerner les concepts identifiés à ce jour en tant que pistes d'optimisation, basés l'un sur un confinement du noyau par des massifs d'appui non ancrés et l'autre sur un confinement du noyau sans massif d'appui.

4.2.1.2 Conforter la constructibilité en conditions opérationnelles

Dans le cadre de la démarche décrite ci-dessus de développement progressif des composants permettant d'apporter l'ensemble des éléments confortant la constructibilité et l'atteinte des performances des ouvrages de fermeture, différents ouvrages seront réalisés dans l'installation souterraine ou au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne en environnement opérationnel.

Afin d'apporter au plus tôt les justifications requises sur la fermeture Cigéo et compte tenu des différents types d'ouvrages de fermeture dans l'installation souterraine et selon leur emplacement, il est prévu de réaliser dans le cadre de la phase industrielle pilote les démonstrateurs suivants (cf. Figure 4-6) :

- un démonstrateur de scellement de descenderie. Il est construit à partir d'une galerie initiée perpendiculairement à la descenderie de service (galerie d'accès). Cette galerie permet l'accès à deux galeries parallèles à la descenderie dédiées respectivement à la mise œuvre d'un scellement de descenderie (galerie démonstrateur) et d'une instrumentation par forage du scellement (galerie d'auscultation). Le démonstrateur de scellement est construit au niveau de l'unité lithostratigraphique USC (unité silto-carbonatée) du Callovo-Oxfordien. Il est équipé de manière à assurer une phase de suivi de son comportement hydromécanique (hydratation naturelle latérale par le Callovo-Oxfordien et hydratation artificielle sur sa face supérieure représentative de l'hydratation par les eaux de l'Oxfordien carbonaté en situation réelle) avant la mise en service de la zone exploitation de l'installation souterraine Cigéo. Le déconfinement du Callovo-Oxfordien produit lors de l'excavation de la galerie puis son reconfinement avec le gonflement du noyau congruant à sa resaturation seront suivis ;
- un démonstrateur de scellement de galerie. Dans la configuration de l'installation souterraine au stade du dossier de demande d'autorisation de création Cigéo, le démonstrateur de scellement de galerie est réalisé dans la zone de soutien logistique travaux, donc dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien. Il pourra comporter une saignée. La galerie du démonstrateur est orientée selon la contrainte principale majeure et contribue à la définition et la démonstration de constructibilité et de fonctionnement associée avant la mise en œuvre des ouvrages de fermeture du quartier de stockage MA-VL et des quartiers pilote et de stockage HA. Tout comme le démonstrateur de scellement en descenderie, ce démonstrateur est instrumenté afin de permettre l'auscultation du noyau de scellement et des massifs d'appui (le cas échéant), complétée par une auscultation du Callovo-Oxfordien environnant.

Par ailleurs, il pourra être envisagé de faire de la fermeture du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, lorsqu'elle sera décidée, un essai de fermeture (remblayage et scellement) en vraie grandeur[38], représentatif de la fermeture d'une installation souterraine. Cette fermeture réalisée suffisamment en amont de celle de l'INB Cigéo pourrait donner des clés de connaissances aux générations qui auront à décider de cette dernière, sur :

- les opérations de démantèlement, de remblayage et de scellement, en particulier de puits, d'une installation souterraine ;
- les comportements hydraulique et hydromécanique de l'installation souterraine et du Callovo-Oxfordien ;
- les comportements hydrauliques des formations géologiques sus-jacentes au Callovo-Oxfordien.

[38] En vertical. On notera que les puits du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne possèdent un diamètre inférieur aux puits de l'installation du centre de stockage Cigéo sans préjudice néanmoins vis-à-vis de la représentativité d'un tel essai.

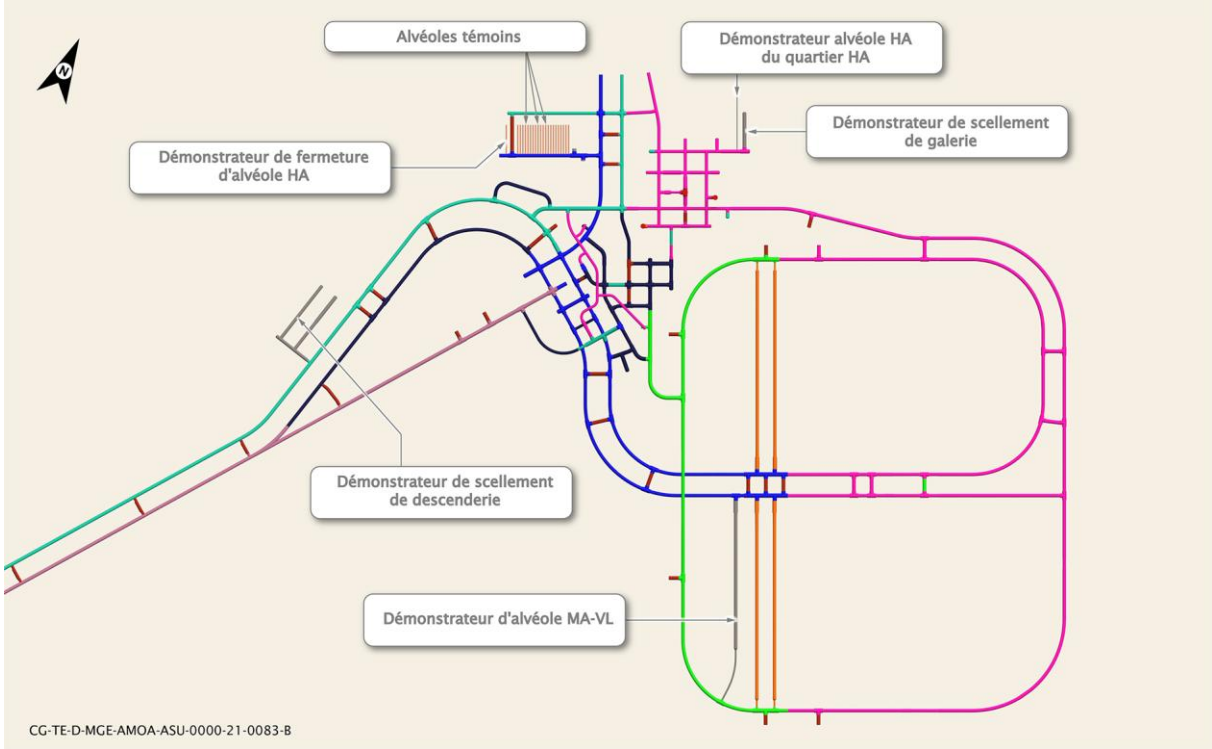


Figure 4-6 Illustration de l'implantation des démonstrateurs de scellements dans l'installation souterraine Cigéo dès la phase industrielle pilote

4.2.1.3 Conforter les modalités de fermeture des alvéoles HA et MA-VL

En parallèle des études concernant les ouvrages de fermeture des ouvrages de liaison, différentes actions sont menées concernant la fermeture des alvéoles HA (cf. Chapitre 4.2.1.3.1 du présent document) et MA-VL eux-mêmes (cf. Chapitre 4.2.1.3.2 du présent document).

4.2.1.3.1 La mise en œuvre des modalités de fermeture des alvéoles des quartiers pilote et de stockage HA

Les études concernant la mise en œuvre de la fermeture des alvéoles de colis de déchets HA se déclinent principalement selon deux axes : d'une part le développement des composants de fermeture de l'alvéole et, d'autre part, la confortation de la compréhension du comportement d'un alvéole fermé.

Dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création, différentes solutions techniques sont actuellement envisagées pour réaliser le bouchon de fermeture de l'alvéole HA (cf. Encadré ci-dessous).

LE BOUCHON DE FERMETURE DES ALVÉOLES HA

L'une des solutions techniques envisagée pour le bouchon de fermeture des alvéoles HA consiste à placer des conteneurs cylindriques de longueur et diamètre identiques à ceux d'un colis de stockage R7/T7 et un conteneur spécifique ajusté au mieux au diamètre du tubage de diamètre un peu plus grand pour des raisons de radioprotection (cf. Figure 4-7).

Chaque conteneur est constitué d'une enveloppe métallique équipée des mêmes interfaces de manutention qu'un colis de stockage et remplie d'un matériau à base d'argile gonflante. Cette enveloppe permet une ouverture différée du conteneur, au-delà de la durée de fonctionnement de l'installation.

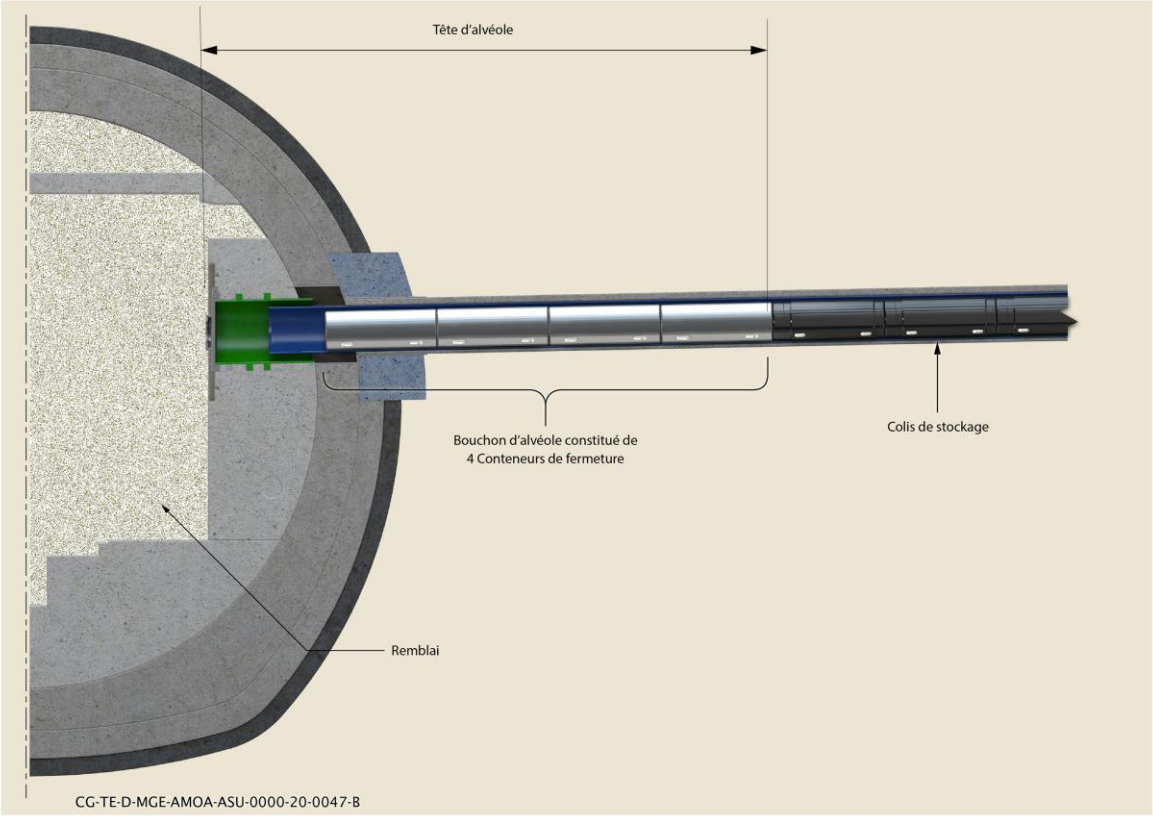


Figure 4-7 *Schéma de principe de la tête d'alvéole HA équipée de son bouchon de fermeture constitué de quatre conteneurs de fermeture*

Le principe de fonctionnement du bouchon est le suivant :

- la fonction du matériau à base d'argile gonflante est de constituer, lors de l'ouverture différée des conteneurs, un bouchon cylindrique comblant les vides résiduels en tête d'alvéole ;
- le matériau à base d'argile gonflante commencera à gonfler au moment où l'enveloppe métallique du conteneur aura été suffisamment corrodée pour permettre à l'eau d'entrer au contact du matériau. Le matériau à base d'argile gonflante développera lors de sa resaturation progressive une pression de gonflement suffisante lui permettant de combler les vides résiduels ;
- la pression de gonflement n'affecte pas l'intégrité ni la position des colis de stockage HA du quartier pilote HA qui sont placés au contact les uns des autres, ni celle des colis du quartier de stockage HA qui sont espacés les uns des autres.

Au stade du dossier de demande d'autorisation de création, la conception des conteneurs de fermeture est à un niveau d'esquisse en termes notamment de masse, de gabarit, de nuance et de formulation de matériaux (acier et matériaux à base d'argile gonflante) ainsi que des procédés de fabrication et de contrôle.

Afin de conforter la constructibilité et le comportement du bouchon de fermeture des alvéoles de déchets HA (ouverture, resaturation, gonflement du matériau à base d'argile gonflante, etc.), des essais en surface seront réalisés à différentes échelles afin de tester le principe de comportement d'un bouchon d'alvéole HA (gonflement du matériau à base d'argile gonflante, extrusion, remplissage des jeux, etc.).

Par ailleurs, un démonstrateur de fermeture d'un alvéole HA est réalisé dans le quartier pilote HA. Cet ouvrage a pour objet d'apporter les éléments confortant la compréhension actuelle du comportement d'un alvéole HA obturé (avec *a priori* la portion de galerie d'accès dans laquelle il est implanté remblayée).

Cet ouvrage, qui serait situé dans le prolongement de la galerie d'accès du quartier pilote HA, a une conception identique à celle d'un alvéole courant du quartier pilote HA. Lors de la réalisation du quartier pilote, cet ouvrage sert de démonstrateur de constructibilité et de qualification du fonctionnement d'un alvéole (cf. Chapitre 2.6.2.3 du présent document). Par la suite, cette portion de galerie d'accès sera remblayée. Les dispositifs de surveillance seront maintenus permettant le suivi de la composition de l'atmosphère interne du démonstrateur ainsi que celle des eaux.

4.2.1.3.2 La mise en œuvre des modalités de fermeture des alvéoles du quartier de stockage MA-VL

En compléments des études support à la confortation de l'exploitation des alvéoles du quartier de stockage MA-VL, un certain nombre d'études auront pour objet de conforter les modalités de mise en œuvre de la fermeture de ces ouvrages (cf. Encadré ci-dessous).

LES SYSTÈMES DE FERMETURE DES ALVÉOLES MA-VL

Une fois le remplissage de l'alvéole terminé, la préparation de sa fermeture peut commencer.

Les blocs de radioprotection au niveau de la dernière nappe de colis sont mis en place (cf. Figure 4-8).

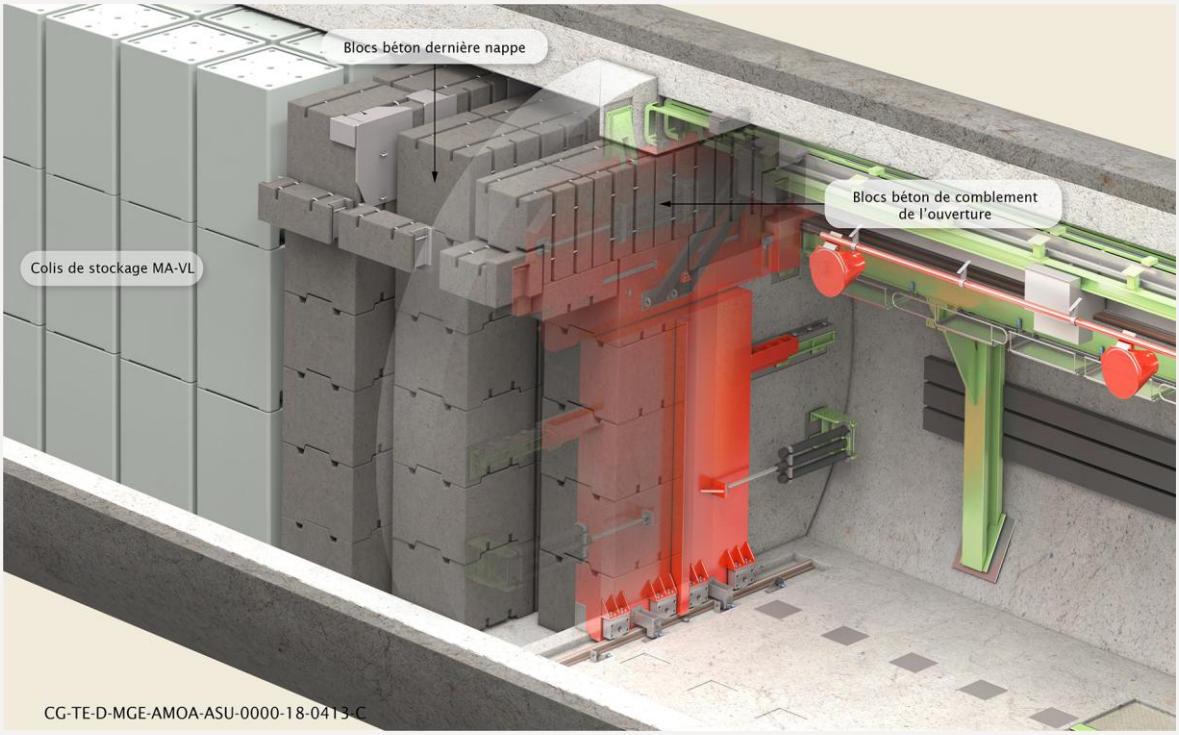


Figure 4-8 *Illustration, des blocs de radioprotection à la fin du remplissage de l'alvéole MA-VL (représentation où la plupart des équipements de la cellule de manutention ont été masqués pour visualiser les blocs)*

Par la suite, les équipements de la cellule de manutention nécessitant de la maintenance sont déposés et ceux qui ne nécessitent pas de maintenance et qui ne sont plus utilisés sont mis en veille. L'alimentation électrique des éléments mis en veille est mise hors tension.

Parmi les équipements qui peuvent être mis en veille, le choix de les démonter ou de les laisser en place pourra être fait au cas par cas en fonction par exemple des risques d'exploitation associés au maintien ou au retrait de l'équipement ou des besoins en cas de retrait de colis. Au cours de cette phase, la ventilation est maintenue.

Par la suite, lors de la fermeture de l'alvéole, une ventilation secondaire de type « ventilation travaux » est mise en place en galerie d'accès et cellule de manutention d'une part et en jonction de retour d'air d'autre part avant d'arrêter la ventilation traversante des alvéoles. L'obturation est réalisée au niveau du voile et des blocs de radioprotection afin d'isoler la partie utile de l'alvéole de sa cellule de manutention et de sa galerie d'accès.

Après le démantèlement complet des équipements, les passages laissés par les fourreaux en radier sont obturés. La cellule de manutention et la galerie d'accès sont ensuite remblayées au moyen d'argilites du Callovo-Oxfordien excavées. Les mêmes opérations sont faites dans la jonction de retour d'air après ou en parallèle des opérations menées en cellule de manutention et en galerie d'accès.

Compte tenu du caractère lointain de la fermeture de l'alvéole, la conception rend également possible la fermeture de chaque extrémité de l'alvéole par des scellements de galerie comme ceux présentés dans le chapitre 4 du présent document.

Les études relatives à la mise en œuvre des modalités de fermeture des alvéoles MA-VL concerneront la consolidation de la maîtrise du risque de formation d'une atmosphère explosive (risque Atex) dans certains alvéoles à cause des gaz de radiolyse produits par certaines familles de déchets. Pour conforter la maîtrise de ce risque, il s'agira d'étudier plus précisément les deux leviers envisagés suivants :

- maintenir le plus longtemps possible la fonctionnalité de la ventilation au cours des opérations de démontage de la cellule de manutention et de la préparation de la fermeture de l'alvéole ;
- diminuer les teneurs en hydrogène dans l'atmosphère de l'alvéole afin d'augmenter le temps d'atteinte de la limite inférieure d'explosivité (LIE) de l'atmosphère interne de l'alvéole.

  Pour ce faire il s'agira d'étudier les dispositifs de piégeage ou de recombinaison de l'hydrogène et leurs modalités de mise en place (performance, maintien de performance dans le temps sans maintenance, coûts, nombre de pièges par alvéole, positionnement dans l'alvéole, etc.).

4.2.2 Conforter la démonstration sûreté et l'atteinte des performances visées

La conception des ouvrages de fermeture a pour objet de permettre la réalisation de l'ensemble des fonctions de sûreté qui leurs sont allouées (cf. Encadré ci-dessous). À ce titre, les ouvrages de fermeture sont des composants importants pour la protection.

Ainsi, en complément des études support à la confortation de leur constructibilité détaillée ci-dessus, différentes études se poursuivent dans le cadre du développement des ouvrages de fermetures vis-à-vis de la confortation de l'atteinte de leurs performances au regard des éléments de conception étudiés.

LES PERFORMANCES ATTENDUES DES SCELLEMENTS

En termes de performance hydraulique, la conception des ouvrages de fermeture doit offrir une résistance hydraulique et, de manière induite afin de garantir l'atteinte de cette performance hydraulique, une performance de soutien mécanique pour préserver à long terme les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.

La performance en grand des scellements est ainsi pilotée par deux caractéristiques : la longueur cumulée de noyau de scellement au droit des zones de dépose du revêtement et leur perméabilité équivalente. Une même résistance hydraulique peut ainsi être obtenue par une très faible perméabilité sur une courte distance ou une perméabilité plus grande sur une plus grande distance.

Au stade du dossier de demande d'autorisation de création, dans le cadre d'une démarche prudente, on retient :

- une perméabilité à l'eau à saturation inférieure ou égale à 10^{-11} m.s^{-1} pour tous les noyaux de scellement et les scellements des liaisons surface-fond en grand et inférieure ou égale à 10^{-9} m.s^{-1} pour les scellements de galeries en grand ;
- une pression de gonflement minimale de l'ordre de 1 à 4 MPa ;
- des zones de dépose multiples (voire totales lorsque cela est possible[39]) et sur une distance cumulée *a minima* pluri-métrique ;
- une pression d'entrée de gaz faible (de l'ordre de 1 à 2 MPa).

Les principaux axes d'études relatifs à la confortation de la conception et du dimensionnement des ouvrages de fermeture au regard de leurs fonctions de sûreté concernent le choix des matériaux constitutifs des ouvrages de fermeture au regard de leurs propriétés (cf. Chapitre 4.2.2.1 du présent document), leur comportement hydromécanique et hydro-mécanique-gaz en grand (cf. Chapitre 4.2.2.2 du présent document) et leur tenue au séisme (cf. Chapitre 4.2.2.3 du présent document).

Ils s'appuieront sur l'amélioration des dispositifs de surveillance du comportement de ces ouvrages et de leur mise en place dans les conditions industrielles de Cigéo (cf. Chapitre 4.2.2.4 du présent document).

4.2.2.1 La définition et le comportement des matériaux constitutifs avec leurs domaines de caractéristiques physico-chimiques

Les travaux expérimentaux menés durant de nombreuses années par l'Andra et ses homologues constituent une base de connaissances solide en termes de capacité de mise en œuvre des matériaux argileux (à base de bentonite ou d'argilites excavées remaniées) et de réalisation des ouvrages de fermeture, de panel de matériaux possibles avec leurs caractéristiques associées et d'atteinte des performances requises (cf. l'encadré du chapitre 4.2.1.1 du présent document).

Cette base de connaissance très importante a été acquise sur des argiles (bentonite, argilites du Callovo-Oxfordien excavées remaniées) pures ou en mélange, en termes de modes de mise en œuvre et de propriétés thermo-hydro-mécaniques (cf. Encadré ci-dessous). Ces données permettent d'orienter les choix quant aux matériaux à retenir pour les ouvrages de fermeture :

- pour les noyaux de scellement, l'utilisation de bentonite en mélange avec du sable offre un bon compromis entre une capacité de gonflement favorable au remplissage des vides technologiques et à la compression de la zone fracturée, des faibles perméabilités à l'eau et une capacité à laisser passer le gaz ;
- pour les remblais, l'ajout de sable aux argilites remaniées permettra si besoin de rigidifier le matériau tout en permettant la migration aisée des gaz.

LE COMPORTEMENT THERMO-HYDRO-MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX DES OUVRAGES DE FERMETURE

Le comportement thermo-hydro-mécanique de matériaux à base d'argilites excavées remaniées a été étudié dans différentes configurations et avec plusieurs additifs dans la perspective de leur utilisation comme matériau de remblai.

Ces matériaux ont été caractérisés en tenant compte notamment de la durée et des conditions d'entreposage des argilites excavées en verse, de la granulométrie des argilites concassées ainsi que du mode de mise en place et de l'influence d'additifs (bentonite, sable, chaux). Les connaissances acquises permettent de disposer d'un ensemble de possibilités pour répondre aux exigences et fonctions souhaitées pour ces matériaux, compatibles avec une mise en place industrielle.

[39] Notamment pour les ouvrages de liaison surface-fond

Les essais réalisés sur les argilites excavées remaniées pures compactées à l'optimum Proctor normal ou modifié ont montré que les propriétés obtenues sont acceptables vis-à-vis des exigences sur la tenue mécanique des ouvrages à long terme.

Plusieurs types d'additifs ont été étudiés pour adapter les propriétés du matériau aux caractéristiques souhaitées :

- le sable : il permet d'améliorer le passage des gaz ainsi que les propriétés de résistance au cisaillement du matériau et sa rigidité. La perméabilité à l'eau du matériau peut augmenter et sa capacité de gonflement diminuer ;
- la bentonite : elle permet d'augmenter les propriétés de gonflement (déformation et pression) du matériau et de diminuer sa perméabilité à l'eau ;
- la chaux : elle conduit à une forte augmentation des caractéristiques mécaniques du matériau, notamment de la résistance à la compression simple et à la traction. La capacité de gonflement est fortement réduite et les perméabilités à l'eau peuvent être augmentées significativement.

Outre l'utilisation d'additifs, les argilites remaniées peuvent être conditionnées et mises en place par différentes techniques autres qu'un compactage *in situ*. L'utilisation de blocs compactés ou de mélanges à base de pellets est possible en permettant d'atteindre des densités sèches initiales et des résistances à la compression significativement élevées ainsi que des pressions de gonflement de plusieurs MPa.

Différentes solutions techniques sont possibles pour la définition et la mise en forme des matériaux argileux utilisés pour les scellements et remblais. Elles ont été testées dans différents essais : compactage en place (essai de Richwiller), mélanges à base de pellets (essai FSS, expérimentations FE (*Full-scale Emplacement*) au Mont Terri et HotBENT (*High Temperature Effects on Bentonite Buffers*) au Grimsel (Suisse)), briques pré-compactées (expérimentation NSC au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, projet FEBEX (*Full-scale Engineered Barriers Experiment*) au Grimsel), argiles projetées (*shot-clay*) (expérimentation TSX réalisée au Canada).

À ce stade, le choix des argiles gonflantes (bentonites) pour le noyau, additionné le cas échéant de matériaux destinés à en ajuster les propriétés (densité, pression de gonflement, pression d'entrée de gaz), faciliter sa fabrication (poudre, pellets, briques) ou sa mise en place permet de répondre aux deux fonctions de par leurs propriétés hydrauliques et hydromécaniques remarquables.

Des études se poursuivent au travers d'un programme d'acquisition complémentaire mis en œuvre à petite échelle (de centimétrique à pluri-décimétrique) ainsi que dans le laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne afin de conforter le fonctionnement des solutions techniques d'ouvrage de fermeture en situation de stockage et les gammes de matériaux ou multi-matériaux permettant de répondre aux exigences attendues pour ces ouvrages.

L'objectif est ainsi de compléter le socle de connaissances en s'appuyant sur des caractérisations ciblées afin d'élargir la gamme de matériaux permettant d'obtenir un compromis entre les différentes propriétés attendues pour les noyaux de scellement et les remblais. Ceci se traduit par :

- des caractérisations des propriétés hydro-mécanique-gaz (HM-gaz) incluant l'influence de la mise en forme sur ces propriétés et les conséquences d'un environnement cimentaire (saturation avec de l'eau cimentaire et transformations minéralogiques éventuelles associées) sur l'évolution HM-gaz des matériaux, avec, en particulier :
  - ✓ une sollicitation hydraulique-gaz appliquée au noyau de scellement de l'essai NSC dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (échelle ½) ;
  - ✓ le retour d'expérience des essais NIH (noyau de bentonite incliné et horizontal en forage) (dans l'unité silto-carbonaté USC au niveau de la niche du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne située à - 445 mètres) et PGZ2 (Perturbation hydromécanique induite par les GaZ dans les noyaux de scellement) au niveau principal du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ;

- des essais sur maquettes à petites échelles en surface (frottement d'un noyau à base de bentonite, interactions hydromécaniques entre noyau à base de bentonite et remblai, etc.).

Un élargissement à d'autres types de matériaux pouvant répondre aux exigences pourra être mené comme par exemple la nature de la bentonite ou du sable pour les noyaux de scellement ou l'utilisation de matériaux granulaires rigides à faible réactivité vis-à-vis de la perturbation alcaline pour les remblais. Une acquisition des données complémentaires (comportement diphasique, couplage avec la chimie) sur les matériaux de noyau et de remblai et leurs modalités de mise en forme sera également menée afin de couvrir un domaine de formulations possibles des matériaux (bentonite, argilites remaniées).

4.2.2.2 Le comportement hydro-mécanique-gaz en grand des ouvrages de fermeture

La principale propriété mise en œuvre dans le fonctionnement des ouvrages de fermeture au regard de leurs fonctions de sûreté est leur comportement hydro-mécanique-gaz (cf. Encadré ci-dessous).

LES ACQUIS SUR LE COMPORTEMENT THERMIQUE-HYDRAULIQUE-MÉCANIQUE ET CHIMIQUE (THMC) DES COMPOSANTS DES OUVRAGES DE FERMETURE

Au stade du dossier de demande d'autorisation de création, la performance en grand des remblais et des scellements est évaluée sur la base :

- d'une analyse fine de l'évolution phénoménologique permettant d'identifier les sollicitations pertinentes aux échelles de temps pertinentes pour le projet. En particulier, les sollicitations thermiques sont faibles à nulles et le caractère passant au gaz limite *de facto* les différentiels de pression de gaz et la pression maximale de gaz ;
- de la quantification des mécanismes d'évolution phénoménologique du système (ouvrage de fermeture ; Callovo-Oxfordien environnant). En complément des travaux expérimentaux, un effort important a été consacré au développement de modèles de comportement hydromécanique des matériaux à base de bentonite et des argilites excavées pour représenter l'évolution des ouvrages de fermeture en situations de stockage, en particulier les différentes phases de vie (resaturation, développement de la pression de gonflement, comportement sous sollicitation au gaz, comportement à long terme).

La stratégie mise en œuvre pour asseoir la maîtrise et la robustesse des modélisations a reposé sur une démarche (i) de confrontation des résultats de modélisation avec des mesures expérimentales et (ii) de participation à des benchmarks numériques, au travers par exemple de projets européens sur le comportement thermique-hydraulique-mécanique et chimique (THMC) des argiles gonflantes (projets européens BEACON (*Bentonite Mechanical Evolution*), GAS (*Mechanistic understanding of gas transport in clay materials*), FORGE (*Fate Of Repository GasEs*), etc.) et dans des exercices internationaux dédiés (Decovalex2019 (*Development of Coupled Models and their Validation against Experiments*), Decovalex2023, etc.).

Les modèles ont intégré progressivement les couplages pertinents entre les phénomènes THMC et la complexité des ouvrages (multi composants, géométrie 3D, etc.). Ces modèles ont été implémentés dans de nombreux codes de calcul permettant de mener des simulations numériques 2D et 3D.

Ces analyses ont mis évidence la capacité :

- pour les remblais (i) à limiter les vides compressibles, (ii) à reprendre les efforts après rupture du revêtement et (iii) à empêcher une réactivation des fractures discrètes et/ou connectées de la zone endommagée mécaniquement. Les déformations globales sont faibles, limitant *de facto* la décharge du Callovo-Oxfordien en champ proche, plus particulièrement au niveau de la zone endommagée fracturée lors du creusement.

  Il en résulte une lente évolution (*i.e.* quasi statique) des galeries, notamment des déformations de la zone endommagée préservant ainsi les épaisseurs de garde verticale saine ;

- pour les scellements, à atteindre une très faible perméabilité répondant aux exigences, que le confinement soit assuré par des massifs d'appui en béton (en prenant en compte leur dégradation mécanique dans le temps du fait de leur dégradation chimique au contact des eaux du Callovo-Oxfordien) ou par un remblai. Ces analyses permettent aussi, *via* des études de sensibilité, de mettre en exergue les poids relatifs des paramètres à considérer. En particulier, les modélisations des scellements indiquent clairement l'importance des frottements aux interfaces entre les différents composants (noyau/roche, noyau/revêtement-soutènement) et celle de la longueur du noyau.

Les efforts ont plus particulièrement porté ces dernières années sur l'influence de la perturbation alcaline induite par le revêtement/soutènement en béton sur le comportement hydromécanique des ouvrages de fermeture, principalement des scellements, afin de bien appréhender ses effets en particulier avec la resaturation de l'ouvrage *pro parte* par de l'eau cimentaire (hors des zones de dépose du revêtement/soutènement).

Il s'agit de poursuivre la démonstration que les scellements à la fois limitent la circulation de l'eau, s'opposant ainsi aux transferts des radionucléides et des substances toxiques chimiques en solution, et ne s'opposent pas significativement au transfert des gaz au sein de l'installation souterraine.

Les études prévues ont ainsi pour principal objet de préciser le comportement hydro-chimique-mécanique-gaz des ouvrages de fermeture à long terme par une prise en compte plus explicite des couplages, afin de vérifier que les performances requises sont satisfaites au regard du domaine de fonctionnement évalué (cf. Chapitre 4.2.2.2.1 du présent document). Elles consistent également en la poursuite d'essais au Laboratoire de recherche souterraine de Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitre 4.2.2.2.2 du présent document).

4.2.2.2.1 Consolidation et précision du comportement hydro-chimique-mécanique-gaz des scellements et remblais

Dans le cadre de la démarche des boucles d'itération entre sûreté/connaissance/conception, des études complémentaires seront menées en prenant en compte (i) la conception des différents types de scellement (scellements de galeries avec massif d'appui ancré ou non dans les argilites du Callovo-Oxfordien et revêtements de type voussoirs compressibles, scellements de galeries sans massif d'appui avec un contact direct remblai/noyau, scellements de puits, scellements de descenderies), (ii) l'ensemble des sollicitations hydro-mécanique-gaz auxquelles sont soumis les scellements et (iii) des modèles de comportements couplés (transfert gaz, fluage des argilites, gonflement du noyau, etc.) pour chacun des matériaux constitutifs.

Des simulations numériques sur les couplages hydro-chimique-mécanique-gaz permettront de consolider et préciser la connaissance sur le comportement hydromécanique des ouvrages de fermeture à long terme et de vérifier que les performances requises sont satisfaites au regard du domaine de fonctionnement retenu. Il s'agira en particulier de conforter l'évaluation des extensions des perturbations chimiques induites pendant le transitoire de resaturation et de leurs conséquences en termes d'évolution des capacités de gonflement du noyau argileux afin de conforter les éléments prudents retenus dans les évaluations de sûreté pour le dossier de demande d'autorisation de création et d'évaluer les marges associées.

Les simulations s'appuieront sur la poursuite des développements de modèles THMC-gaz couplés et des améliorations des capacités numériques des outils de simulation numérique.

Dans la continuité de ce qui a été fait lors des étapes précédant le dossier de demande d'autorisation de création, ces modèles et simulations numériques feront l'objet d'exercices d'inter-comparaison, notamment sur la base des essais réalisés dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

4.2.2.2.2 Essais en conditions représentatives au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne

Au déjà de l'objectif premier de confortation de la constructibilité des ouvrages de fermeture, des tests de performance sont également envisagés à l'aide d'essais de démonstration de scellements au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (*e.g.* essais déjà engagés ou envisagés) afin de :

- conforter le comportement hydraulique-gaz en grand après resaturation (gonflement, tassement différé, comportement au gaz) ;
- fournir une comparaison entre l'observé et le prédictif des essais.

Le suivi puis le démantèlement de ces futurs essais de scellements permettront de comprendre de manière détaillée leur fonctionnement en situation représentative en support à la préparation des démonstrateurs de scellement qui seront réalisés dans l'installation souterraine en situation opérationnelle.

En complément, en lien avec le dimensionnement des éventuels massifs d'appui en béton, des essais visant à évaluer le comportement en cisaillement de la zone endommagée pourraient être également menés.

4.2.2.3 La tenue au séisme des ouvrages de fermeture

Le dernier axe d'études relatif à la confortation du comportement des ouvrages de fermeture porte sur leur tenue au séisme.

De nombreuses études ont déjà permis d'évaluer la tenue au séisme des ouvrages de fermeture (cf. Encadré ci-dessous).

LES ACQUIS SUR LA TENUE AU SÉISME DES OUVRAGES DE FERMETURE

Les fonctions attribuées aux ouvrages de fermeture n'étant pas limitées dans le temps, la vérification du maintien de leur performance sous sollicitation sismique doit être réalisée au regard de cette spécificité. En après fermeture, cette fonction est associée au SMPP (séisme maximum physiquement possible) (cf. Chapitre 2.8.1 du présent document).

Au stade du dossier de demande d'autorisation de création, la justification de la tenue au séisme des ouvrages de fermeture s'appuie sur :

- la connaissance du site (passé, actuel et futur) qui lui confère un caractère durablement (quasi-)asismique ;
- l'examen d'ouvrages souterrains, plus ou moins analogues (tunnels, cavernes, mines, etc.), montrant dans ces ouvrages que les dégâts sismiques sont inexistants ou réduits ;
- des modélisations préliminaires à l'échelle de l'architecture souterraine en grand en « râteau » qui montrent qu'elle n'est pas de nature à générer des phénomènes de réflexion, d'amplification ou de résonance interne sous l'effet d'une onde sismique en grand ;
- des modélisations préliminaires à l'échelle des ouvrages qui montrent que les ouvrages, intégrés au terrain, ont une faible capacité de résonance et que, même aux fréquences les plus énergétiques (*i.e.* les basses fréquences), les amplifications sont négligeables et les surcontraintes générées faibles ;
- les connaissances sur le comportement des matériaux argileux, en particulier les bentonites, notamment leur comportement plastique et leur capacité de cicatrisation après une (éventuelle) fracturation liée à un séisme.

En complément, des modélisations plus poussées de vérification de la tenue hydromécanique des ouvrages de fermeture au séisme seront effectuées avec la prise en compte de différentes situations couvrant différents états de saturation (en lien avec le transitoire hydraulique-gaz, les états de dégradation, etc.) et au regard de chaque situation temporelle associée ; la sollicitation sismique afférente couvrant une sollicitation extrême (SMPP).

L'opportunité de pouvoir réaliser des essais sur table vibrante à échelle réduite sera en parallèle examinée.

4.2.2.4 La surveillance des ouvrages de fermeture

Pendant la phase de construction initiale puis lors du déploiement des tranches ultérieures s'il y a lieu, des sections de puits, de descenderie et de galeries de liaison représentatives des zones de futurs scellements (en termes de méthode de creusement et de composants mis en place), sont instrumentées afin de vérifier :

- que les propriétés hydrauliques de la roche en paroi au droit des futurs scellements restent dans le domaine couvert par l'évaluation de sûreté (perméabilité, porosité associée à l'extension spatiale de la zone endommagée dont la zone fracturée connectée) ;
- qu'il n'y a pas de création de zone fracturée connectée au droit des futurs scellements des liaisons surface-fond pendant l'exploitation ;
- la faisabilité du retrait du revêtement pendant l'exploitation en suivant le chargement mécanique du revêtement.

Les dispositifs de mesure envisagés pour suivre le comportement du Callovo-Oxfordien endommagé mécaniquement autour des ouvrages de fermeture sont ceux déjà testés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne pour évaluer le comportement de la zone endommagée autour des ouvrages réalisés et ceux dont le développement doit se poursuivre (*e.g.* mesures géophysiques) (cf. Chapitre 2.1.5.3 du présent document).

En préparation de la phase industrielle pilote, les travaux prévus visent à démontrer la capacité à mettre en œuvre les dispositifs de surveillance et à suivre les différents processus. Ils seront d'abord appliqués aux essais d'ouvrages de fermeture réalisés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne pour préparer et justifier l'instrumentation des démonstrateurs réalisés lors de la phase industrielle pilote (type de capteurs, positionnement, etc.).

Plus spécifiquement, les activités liées au traitement des données et la qualification des mesures (extension de la gamme de mesures) issues de l'adaptation des capteurs capacitifs pour le suivi de la teneur en eau des composants argileux seront poursuivies en vue de leur mise en œuvre dans l'installation souterraine.

4.2.3 La veille et l'intégration des avancées scientifiques et technologiques

Dans une logique d'actions prospectives et de veille, des études de pré-industrialisation de la réalisation des ouvrages de fermeture (notamment la dépose des revêtement) seront menées sur les prochaines décennies et mises à jour le cas échéant en fonction de l'évolution des technologiques ou des bonnes pratiques. Ainsi, l'Andra développera notamment l'industrialisation de la dépose de voussoir, en se focalisant, au regard de la temporalité lointaine de réalisation des scellements, sur des études de faisabilité et sans préjuger des techniques qui seront disponibles au moment de la préparation de la fermeture effective de l'installation souterraine.

Par ailleurs, une veille scientifique sur l'utilisation possible d'autres types de matériaux et de modes de mise en forme et de mise en place (en termes d'optimisation technico-économique de la réalisation et d'accroissement des marges de conception et de dimensionnement), ainsi que sur les pratiques internationales (cf. Les travaux des homologues étrangers de l'Andra) et les analogues dans le cadre d'installation souterraine hors du domaine du stockage géologique de déchets radioactifs sera menée dans une logique d'amélioration continue, de sécurisation vis-à-vis des filières d'approvisionnement et afin de nourrir, si besoin, la conception des ouvrages de fermeture des meilleures techniques disponibles.

4.3 L'organisation temporelle des actions

Ce chapitre reprend les actions présentées ci-avant sous forme d'un logigramme indiquant leur enchaînement afin de donner une vision intégrée en lien avec le déploiement de l'installation nucléaire Cigéo jusqu'à l'autorisation de fermeture du stockage (cf. Figure 2-44).

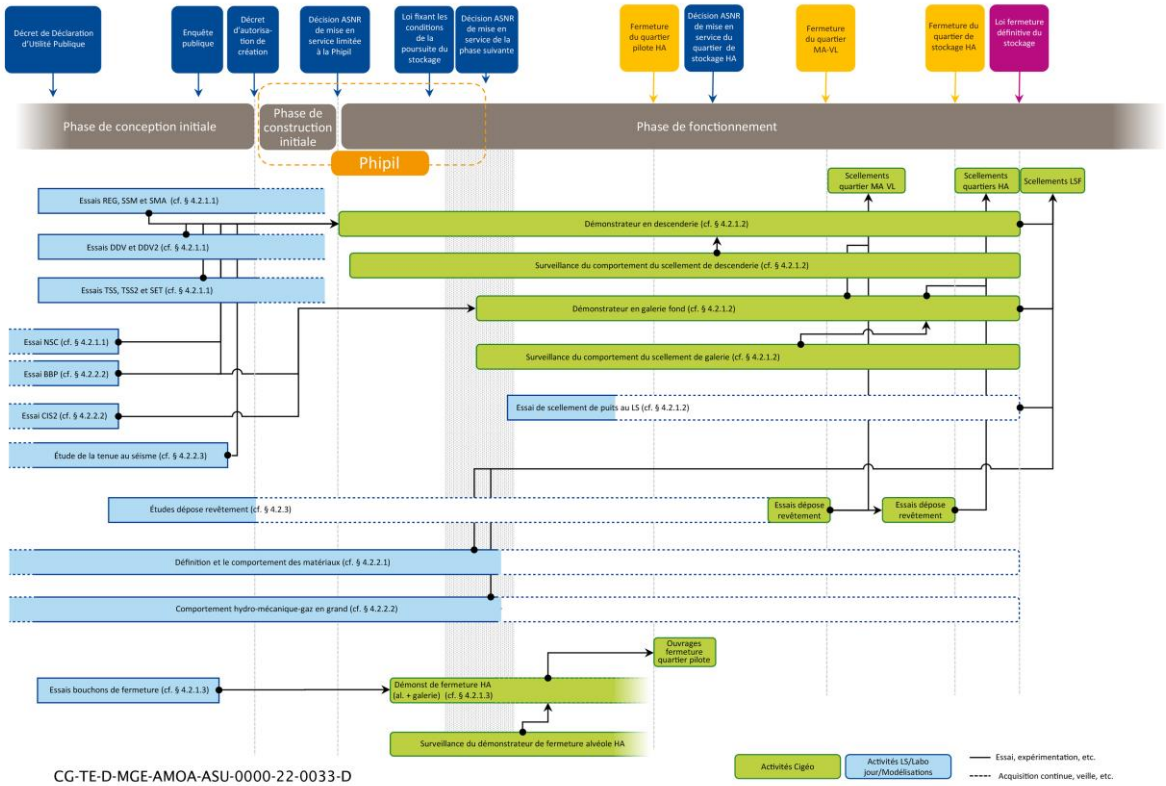


Figure 4-9 *Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives aux scellements. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions. (* La Phipil prend fin avec la décision de l'ASNR sur la mise en service suivante. Elle pourra inclure la construction et/ou l'exploitation de la T2)*

5

L'anticipation de potentielles évolutions d'inventaire des déchets

L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, modifié par la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 (27) 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, impose que le centre de stockage Cigéo soit réversible. L'adaptabilité constitue l'un des quatre volets de la réversibilité (cf. Encadré au chapitre 1.3 du présent document).

Par ailleurs, l'article D. 542-91 du code de l'environnement dispose que « *le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence » mais qu'il « est également conçu [...] pour être en mesure d'accueillir les substances qui figurent à [l']inventaire [de réserve], sous réserve le cas échéant d'évolutions dans sa conception pouvant être mises en œuvre en cours d'exploitation à un coût économiquement acceptable* ».

L'adaptabilité vise à couvrir les incertitudes sur les inventaires en nombre et typologies de colis « *liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique* » par la vérification de la faisabilité du stockage des colis de l'inventaire de réserve et par l'identification d'évolutions dans sa conception et/ou de mesures conservatoires à mettre en place dès sa construction initiale.

À ce titre, l'inventaire de réserve retenu pour la demande d'autorisation de création (52) est constitué :

- de déchets HA vitrifiés et de déchets MA-VL de structure compactés et technologiques correspondant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc électronucléaire actuel de 10 ans et au déploiement de 6 EPR2 ;
- de combustibles usés non retraités issus des réacteurs électronucléaires du parc actuel et de 6 EPR2, de la recherche et de la propulsion navale ;
- de certains déchets FA-VL au titre des incertitudes liées notamment à la mise en place de filières de gestion de ces déchets.

Sur la base d'une esquisse de concepts pour l'éventuel stockage des déchets de l'inventaire de réserve, les études sur l'adaptabilité fournissent les éléments permettant d'apporter la raisonnable assurance que la démonstration de sûreté est confirmée pour les déchets de l'inventaire de réserve.

Les « *modifications éventuelles à apporter aux installations « support » (descenderies, galeries d'accès, installations de surface, ventilation...)* » (1) en cas de décision de stocker tout ou partie des colis de l'inventaire de réserve, sont identifiées et prises en compte dans la conception de l'INB dès la construction initiale.

Vis à vis de la R&D, afin de permettre « *de disposer, en temps voulu, de la démonstration complète de la sûreté de leur stockage » répondant, notamment aux besoins de l'adaptabilité* » (1), l'Andra a identifié et jalonné différents axes de développement en lien avec la progressivité de la construction dont le principal objectif est de donner de la visibilité sur les compléments de démonstration de sûreté et de conception au-delà de la phase d'esquisse qui seraient nécessaires pour confirmer la démonstration de sûreté en exploitation et après fermeture. Les axes de R&D identifiés pour l'inventaire de référence couvrent en quasi-totalité les besoins pour l'adaptabilité dans une logique de consolidation ou d'optimisation. La R&D spécifique pour les sujets de sûreté propres à l'adaptabilité porte sur les combustibles usés :

- la poursuite de la caractérisation de leur comportement en situation de stockage (termes sources) sur la base du socle de connaissances important déjà disponible ;
- la consolidation de la démonstration de l'absence de risque de criticité après-fermeture :
  - ✓ en particulier pour les combustibles civils et militaires du CEA qui ont des caractéristiques très diverses en termes de natures physico-chimiques/caractéristiques géométriques pour un nombre de combustibles limité comparativement aux combustibles UOx/MOx.

En outre, les actions de reconnaissance déjà prévues dans le cadre du déploiement de l'INB Cigéo, pour l'inventaire de référence, notamment avec la réalisation de forages profonds (campagne ZBS) et la reconnaissance à l'avancement, permettront de confirmer et d'affiner, la connaissance des propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien sur toute la ZIOS, en particulier dans la partie prévue pour le déploiement éventuel des quartiers de stockage des combustibles usés, et à ses abords immédiats. Ces connaissances permettront le cas échéant de définir de manière précise l'architecture souterraine associée à l'inventaire de réserve.

Par ailleurs, les éventuelles modifications à apporter aux installations « support » (liaisons surface-fond, galeries de liaison, installations de surface, ventilation, etc.) et leur impact sur la démonstration de sûreté de l'installation seront étudiées et intégrées dans le cadre du développement progressif de l'installation nucléaire Cigéo. Ces études de conception et de sûreté et les essais associés à l'inventaire de réserve seront poursuivis pour :

- compléter, en premier lieu, les analyses actuelles de niveau esquisse par des études plus approfondies, de type avant-projet, sur des sujets identifiés à enjeux, pour affiner la conception et la robustesse de la démonstration, en particulier sur des sujets tels que la ventilation nucléaire dans le cas du stockage des combustibles usés ;
- intégrer les améliorations continues du projet, comme par exemple, l'amélioration de la connaissance des critères de dimensionnement THM issue des travaux pour la configuration de référence retenue dans le dossier de demande de création, afin d'optimiser les architectures souterraines pour l'inventaire de réserve et d'apporter encore plus de robustesse à la conception de stockage de l'inventaire de réserve sur les mêmes principes que pour la configuration de référence ;
- intégrer les enseignements du retour d'expérience du déploiement de l'installation nucléaire Cigéo, les solutions issues des veilles technologiques ainsi que les meilleures techniques disponibles à l'horizon de la mise en stockage possible des combustibles usés après décroissance thermique sur des durées de même ordre de grandeur que pour les colis HA1/HA2.

En cas de changement de stratégie de retraitement, le déploiement des solutions de stockage des combustibles usés de l'inventaire de réserve se ferait concomitamment au stockage de colis de déchets de haute activité de l'inventaire de référence, soit à l'horizon de 2080. Les études et essais réalisés pour répondre aux grands axes indiqués ci-dessus et programmés selon l'avancement du projet, seront alors complétés par des études approfondies de niveau d'avant-projet pour l'ensemble de l'inventaire concerné par la décision.

ANNEXES

Annexe 1 Les expérimentations au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne

Tableau Annexe 1-1 Liste des expérimentations dans l'installation souterraine du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne citées dans le document

Expérimentation	Dénomination
AHA	Auscultation alvéole HA
CDZ	Compression mécanique de l'EDZ
DRO	Diffusion de radionucléides en présence de molécules organiques
GCR	Galerie de conception rigide
GER	Galerie d'essai de revêtement
KEY	Dispositif de clé d'ancrage
MAV	Matériaux – Altération du verre
MCO	Matériau Corrosion
NIH	Noyau de bentonite Incliné et horizontal en forage
NSC	Noyau et scellement
OMA	Ouvrage MA-VL
ORS	Observation et comportement des revêtements/soutènements
PGZ2	Perturbation hydro-mécanique induite par les gaz dans les noyaux de scellement
RTC	Revêtement traditionnel avec une couche compressible
TSS	Tests de scellement et saignées

Tableau Annexe 1-2 Liste des expérimentations menées en surface, au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et à ses alentours cités dans le document

Expérimentation	Dénomination
EVA	Eaux des verses d'argilites
FSS	*Full Scale Sealing*
SET	Essai de remplissage de saignée

TABLEAU DE TRAÇABILITE DES PRINCIPALES EVOLUTIONS

Le tableau suivant précise les paragraphes qui présentent des évolutions ainsi que leur origine qui peut être de différente nature :

- évolution réglementaire : mise en cohérence avec les évolutions de réglementation post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- instruction technique avec l'ASNR : intégration de précisions apportées à l'ASNR en cours d'instruction technique en lien avec le contenu du dossier de DAC ;
- cohérence dossier : mise en cohérence entre pièces du dossier de DAC ;
- cohérence DR0 : mise en cohérence avec le dossier DR0 déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossier de chiffrage : mise en cohérence avec le dossier de chiffrage déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossiers PNGMDR : mise en cohérence avec les dossiers en réponse au PNGMDR déposés post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence politique énergétique : mise à jour de l'inventaire de réserve et des études de sûreté associées pour tenir compte des évolutions de politique énergétique. Ces éléments ont été communiqués à l'ASNR dans le cadre de l'instruction technique ;
- cohérence planning : intégration de la mise à jour de la date de mise en service annoncée post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence conditionnement : mise en cohérence avec les évolutions de conditionnement des colis primaires annoncées par les producteurs post-dépôt initial du dossier de DAC.

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
1.2	Le plan de développement et sa place dans le dossier de DAC	X								

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
1.4.5	La démarche générale de réalisation des essais pour l'autorisation de mise en service…						X			
2.6.2	La démarche progressive support à la construction et à la qualification du fonctionnement de l'alvéole HA		X							
2.6.3	Le maintien d'une acquisition continue des connaissances		X							
4.2.2	Conforter la démonstration sûreté et l'atteinte des performances visées			X						

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
5	L'anticipation de potentielles évolutions d'inventaire des déchets	X						X		

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Structuration des pièces du dossier de demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo	13
Figure 1-2	Schéma d'enchaînement général des essais pour l'autorisation de mise en service et des essais en actif après l'autorisation de mise en service	25
Figure 2-1	Illustration des phases temporelles de développement de l'INB Cigéo	31
Figure 2-2	Log stratigraphique et épaisseurs des formations géologiques rencontrées à l'aplomb du site d'implantation du centre de stockage Cigéo	33
Figure 2-3	Bloc géologique 3D à l'échelle de la zone de transposition et de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) avec un log géologique établi au niveau du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	36
Figure 2-4	Représentation schématique de la fracturation induite autour d'ouvrages souterrains localisés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien, suivant leur orientation : à gauche : galerie orientée suivant la contrainte horizontale mineure, à droite : galerie orientée suivant la contrainte horizontale majeure	50
Figure 2-5	Schéma de principe d'un colis de stockage HA	60
Figure 2-6	Schéma de principe d'un conteneur de stockage MA-VL : exemple du CS3	62
Figure 2-7	Schéma de principe d'un panier de stockage de colis de déchets MA-VL CSD-C	63
Figure 2-8	Schéma de principe d'un panier de stockage de colis de déchets MA-VL 500 L FI	64
Figure 2-9	Schéma illustratif d'un concept de panier de stockage optimisé de colis de déchets MA-VL CSD-C	64
Figure 2-10	Schéma de principe d'un panier de stockage optimisé de colis de déchets MA-VL 500 L FI	65
Figure 2-11	Vue illustrative des ouvrages de la zone descenderie construits pendant la phase de construction initiale (espace technologique et Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne préexistants représentés à titre indicatif)	66
Figure 2-12	Vue illustrative des ouvrages de la zone puits construits pendant la phase de construction initiale	67
Figure 2-13	Illustration d'un exemple d'implantation de la cellule de contrôle de dégazage dans le bâtiment de surface nucléaire	70
Figure 2-14	Illustration de la zone puits et de la zone travaux comprenant les verses	71
Figure 2-15	Illustration de l'architecture souterraine de stockage Cigéo en tranche 1	74
Figure 2-16	Illustration du déploiement temporel de la première tranche de l'installation souterraine au cours de la phase industrielle pilote	74
Figure 2-17	Schéma illustratif des puits et des descenderies	75
Figure 2-18	Plan d'architecture des ouvrages souterrains et modes de creusement envisagés	77
Figure 2-19	Exemples de solutions de revêtement compressible testées et éprouvées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	79
Figure 2-20	Photographie de l'essai de chargement accéléré d'anneau de voussoirs compressibles mené à l'université Gustave Eiffel	81

Figure 2-21	Illustration du nombre d'intersections en tranche 1 (T1) – Scénario 1 avec 54 intersections à réaliser au minimum en T1 et scénario 2 avec 72 intersections à réaliser au maximum en T1	82
Figure 2-22	Illustration du véhicule funiculaire chargé d'une hotte MA-VL	87
Figure 2-23	Photographie du banc d'essai du système de freinage du funiculaire	88
Figure 2-24	Illustration de la conception d'une hotte de transfert MA-VL	89
Figure 2-25	Illustration du système d'étanchéité entre la hotte de transfert et la paroi d'accostage	90
Figure 2-26	Illustrations des configurations du pont stockeur pour les différentes nappes de stockage de colis en conteneurs de stockage ou en paniers	91
Figure 2-27	Photographie du banc d'essai du pont stockeur – Vue générale	92
Figure 2-28	Illustration de l'ensemble robot bride et de mesures	93
Figure 2-29	Photographie du robot SAM pour les mesures de gaz dans l'essai d'alvéole HA AHA1605 au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	94
Figure 2-30	Illustration du quartier pilote HA	96
Figure 2-31	Vue générale illustrative d'un alvéole dans le quartier pilote HA et de sa galerie d'accès	97
Figure 2-32	Illustration du massif d'accostage d'un alvéole HA dans le quartier pilote HA	98
Figure 2-33	Tête de l'essai d'alvéole HA AHA1631 réalisé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	100
Figure 2-34	Photographie du test de mise en place et de récupérabilité sur 100 mètres de longueur d'un colis HA dans un alvéole fortement déformé, à l'aide du « robot ESDRED »	104
Figure 2-35	Photographies du robot de retrait d'un colis de stockage HA en alvéole HA	105
Figure 2-36	Photographie de la pose de fibres optiques axiales dans l'essai d'alvéole HA AHA1605 réalisé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	113
Figure 2-37	Photographie d'un essai de soudage orbital de tronçons de chemisage HA	114
Figure 2-38	Vue générale illustrative d'un alvéole MA-VL et de sa galerie d'accès	116
Figure 2-39	Photographie de la demi-section supérieure excavée de l'expérimentation OMA réalisée dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	119
Figure 2-40	Localisation du démonstrateur de constructibilité MA-VL réalisé en tanche 1	121
Figure 2-41	Photographie de l'essai de retrait d'un colis MA-VL désaxé sur sa pile	122
Figure 2-42	Photographie d'un exemple de robot d'inspection sur rail pour alvéole MA-VL	129
Figure 2-43	Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives au quartier pilote HA. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions	136
Figure 2-44	Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives aux quatre premiers alvéoles MA-VL. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions	137
Figure 3-1	Illustration du déploiement temporel de l'installation souterraine des tranches ultérieures	140
Figure 3-2	Illustration d'un remplissage d'alvéole MA-VL de colis CBF-C'2 en stockage direct	144
Figure 3-3	Schéma de l'évolution de la cinétique d'altération sous eau du verre	146
Figure 3-4	Illustration du quartier de stockage HA à terminaison avec les ouvrages hors alvéoles	154
Figure 3-5	Champ de conductivités thermiques 3D du Callovo-Oxfordien estimé sur la ZIRA à partir de la sismique 3D haute résolution	157

Figure 3-6 Plan général du quartier de stockage MA-VL en tranche 1 (à gauche) et illustration à terminaison (à droite), avec les différents ouvrages 160
Figure 3-7 Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives au quartier de stockage HA. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions. (* : la Phipil prend fin avec la décision de l'ASNR sur la mise en service suivante. Elle pourra inclure la construction et/ou l'exploitation de la T2) 164
Figure 3-8 Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives aux tranches ultérieures du quartier de stockage MA-VL Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions. (* : la Phipil prend fin avec la décision de l'ASNR sur la mise en service suivante. Elle pourra inclure la construction et/ou l'exploitation de la T2) 165
Figure 4-1 Illustration de la localisation des scellements 168
Figure 4-2 Schéma de principe illustratif d'un scellement de galerie (solution technique de référence avec massifs d'appui en béton) 170
Figure 4-3 Schémas de principe illustratif de scellement de liaison surface-fond (à gauche : scellement de descenderie ; à droite : scellement du puits travaux personnel, ventilation air frais (VFT) 170
Figure 4-4 Photographie de l'essai de scellement de galerie FSS (Full Scale Sealing) 177
Figure 4-5 Photographie de l'essai Key de réalisation d'une saignée réalisé dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne 178
Figure 4-6 Illustration de l'implantation des démonstrateurs de scellements dans l'installation souterraine Cigéo dès la phase industrielle pilote 180
Figure 4-7 Schéma de principe de la tête d'alvéole HA équipée de son bouchon de fermeture constitué de quatre conteneurs de fermeture 181
Figure 4-8 Illustration, des blocs de radioprotection à la fin du remplissage de l'alvéole MA-VL (représentation où la plupart des équipements de la cellule de manutention ont été masqués pour visualiser les blocs) 182
Figure 4-9 Logigramme prévisionnel d'enchaînement des actions relatives aux scellements. Les longueurs temporelles des barres ont pour objet de positionner l'enchaînement relatif des actions. (* La Phipil prend fin avec la décision de l'ASNR sur la mise en service suivante. Elle pourra inclure la construction et/ou l'exploitation de la T2) 191

Tableaux

Tableau Annexe 1-1 Liste des expérimentations dans l'installation souterraine du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne citées dans le document 198
Tableau Annexe 1-2 Liste des expérimentations menées en surface, au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et à ses alentours cités dans le document 198

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Lettre CODEP-DRC-2018-001635 de l'ASN 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). N°CODEP-DRC-2018-001635. 45 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/Lettre-adressee-a-l-Andra-precisant-les-options-de-surete-Cigeo.

2 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 16 - Plan directeur de l'exploitation. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-19-0001.

3 Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Assemblée nationale; Sénat (1992). Journal officiel de la République française (JORF), N°INDX9100071L.

4 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. L'importance des itérations entre sûreté, conception et connaissances dans le développement progressif du centre de stockage Cigéo. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0087.

5 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). N°2018-AV-0300. 7 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/155337/1525188?version=3.

6 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). 10 p. Disponible à l'adresse : https://www.cigeo.gouv.fr/sites/default/files/2018-08/AVIS-ASN-dechets-2006-02-01.pdf.

7 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. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2011). 3 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/52193/362788?version=1.

8 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 2 - Nature de l'installation. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-XEE-0000-19-0003.

9 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 6 - Étude d'impact du projet global Cigéo. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-0000-22-0005.

10 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 8 - Étude de maîtrise des risques. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-19-0037.

11 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 13 - Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-PDG-AMOA-OBS-0000-19-0001.

12 Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo. Pièce 8 - Avis émis sur le projet de centre de stockage Cigéo. Andra (2020). Document N°CG-TE-D-RAP-AMOA-TR0-0000-19-0005.

13 Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le centre de stockage Cigéo (52-55). Autorité environnementale (2021). N°2020-79. 56 p. Disponible à l'adresse : https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/210113_cigeo_52_55_delibere_cle26329f.pdf.

14 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 9 - Capacités techniques de l'exploitant. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-XEE-0000-19-0001.

15 Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (version consolidée au 24 septembre 2018). Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement; Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVP1202101A.

16 Arrêté du 11 janvier 2016 portant homologation de la décision n° 2015-DC-0532 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 17 novembre 2015 relative au rapport de sûreté des installations nucléaires de base. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2016). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVP1600309A.

17 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. Ministère de la Transition écologique et solidaire (2017). Journal officiel de la République française (JORF), N°TREP1715555A.

18 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 19 - Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-0000-19-0040.

19 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/content/download/50883/352509?version=2.

20 Déterminer le périmètre d'une INB (guide de l'ASN n° 9). Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2013). 16 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/l-asn-reglemente/guides-de-l-asn/guide-de-l-asn-n-9-determiner-le-perimetre-d-une-inb.

21 Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Assemblée nationale; Sénat (2006). Journal officiel de la République française (JORF), N°ECOX0600036L.

22 Rapport d'évaluation n° 7. Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE) (2001). 177 p. Disponible à l'adresse : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/014000485.pdf.

23 Rapport d'évaluation n° 8. Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE) (2002). 129 p. Disponible à l'adresse : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/024000555.pdf.

24 Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014). N°SSG-31. 96 p.

25 Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011). N°SSG-14. 104 p.

26 Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011). N°SSR-5. 62 p.

27 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. Assemblée nationale; Sénat (2016). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVX1614324L.

28 Rapport d'évaluation n° 14. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2020). 102 p. Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/rapports-de-la-cne2-de-2007-a-aujourdhui/.

29 Rapport d'évaluation n° 16. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2021). 94 p. Disponible à l'adresse : https://cne2.fr/telechargements/RAPPORT_CNE2_16_2022.pdf.

30 Le dossier 2005. Andra (2005). Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference#section-967.

31 Stockage réversible profond - Étape 2009. Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation de surface. Andra (2010). Document N°DCOM/DIR/10-0106. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/391.pdf.

32 Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR20000150062. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.

33 Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR10000150060. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf.

34 Rapport d'évaluation n° 6. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2012). 70 p. Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/rapports-de-la-cne2-de-2007-a-aujourdhui/.

35 Dossier 2005 Argile. Tome architecture et gestion du stockage géologique. Andra (2005). Document N°PUBLI/15-2402. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/268.pdf.

36 Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Association française de normalisation (Afnor) (1992), NF P11-300.

37 Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (version consolidée au 20 novembre 2014). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2014). Journal officiel des Communautés européennes, N°CELEX:32000L0060.

38 Réalisation de remblais et des couches de forme (GTR) - Fascicule 1 - Principes généraux. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) (ex-SETRA) (1992). Guide technique. ISBN : 2-11-085707-2.

39 Rosin-Corre, N., Noret, C., Bordes, J.L. L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience. Proceedings colloque Comité français des barrages et réservoirs (CFBR) (2012). Vol. Thème2 : Auscultation et suivi des ouvrages.

40 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception de l'alvéole HA. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0044.

41 Le développement progressif du centre de stockage Cigeo et le jalonnement des décisions associées. Andra (2020). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-RV0-0000-20-0002.

42 ESDRED - Module 1 (Buffer construction technology) - Final report. European Commission (2009). N°Mod1-WP6-D6 Rev1.

43 Avis de l'IRSN n° 2015-00348 Andra - Cigéo - Plan de développement des composants du projet Cigéo - Lettre ASN/CODEP-DRC-2015-009127 du 9 mars 2015. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2015). 11 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/AVIS-IRSN-2015-00348.pdf.

44 RFS I.1.c du 31 mai 2001 - Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2001). N°Règle fondamentale de

sûreté n° 2001-01. 15 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/l-asn-reglemente/rfs/rfs-relatifs-aux-inb-autres-que-rep/rfs-2001-1-rfs-i.1.c.-du-31-05-2001.

45 Arrêté du 23 février 2017 pris en application du 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. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en charge des Relations internationales sur le climat (2017). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVR1635310A.

46 Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018 : évaluation comparée des différents modes de gestion envisagés pour les déchets bitumés. Commissariat à l'énergie atomique (CEA); Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra); Orano; Électricité de France (EDF) (2020). N°DVS-DRC-CRE-26817. 34 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/Evaluation-comparee-des-differents-modes-de-gestion-envisages-pour-les-dechets-bitumes-CEA-EDF-Orano-Andra.

47 Rapport d'évaluation n° 15. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2021). 112 p. Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/rapports-de-la-cne2-de-2007-a-aujourdhui/.

48 Van Geet, M., Bastiaens, W., Volckaert, G., Weetjens, E., Sillen, X., Maes, N., Imbert, C., Billaux, D., Touzé, G., Filippi, M., Plas, F., Villar, M.V., Garcia-Gutierrez, M., Mingarro, M., Gens, A., Vallejan, B. RESEAL II: A large-scale in situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock - Phase II. European Commission (2009). N°EUR 24161. 288 p. Disponible à l'adresse : https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/FIKW/FIKW-CT-2000-00010/reseal-2-final-report-july-2009_en.pdf.

49 ESDRED - Module 6 (Integration activities) - Final summary report and global evaluation of the project. European Commission (2009). N°Mod6-WP4-D6. 101 p. Disponible à l'adresse : https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/508/508851/104143941-6_en.pdf.

50 DOPAS final report: The full-scale demonstration of plugs and seals (DOPAS) 2012-2016. DOPAS; Posiva Oy (2016). Disponible à l'adresse : https://cordis.europa.eu/docs/results/323/323273/final1-dopas-final-report-final-ec.pdf.

51 Chandler, N.-A., Cournut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Vignal, B. The five year report on the tunnel sealing experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP. Atomic Energy of Canada Ltd (AECL); Japan Nuclear Cycle development Institute (JNC); Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) (2002). N°AECL-12127. 421 p. Disponible à l'adresse : https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21313951.

52 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Inventaire de réserve de l'INB Cigéo. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-ESE-0000-19-0329.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

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

www.andra.fr

© Andra • 2026 • Conception-réalisation : www.kazoar.fr • Crédit illustration : Andra