ANDRA.398.B

DOCUMENT TECHNIQUE

DOSSIER D'OPTIONS TECHNIQUES DE RÉCUPÉRABILITÉ

(DORec)

Identification
CG-TE-D-NTE-AMOA-RV0-0000-15-0059/A

08/04/2016

ANDRA
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

En raison d’une étude de brevetabilité en cours, des informations ont été volontairement occultées en bas de page 57 et sur les deux figures de la page 58 par rapport au document d’origine.

Sommaire

Tables des illustrations 5

1 Introduction 7

1.1 Contexte 8

1.2 Définitions 8

1.2.1 Stockage et entreposage 8
1.2.2 Réversibilité et récupérabilité 9
1.2.3 Echelle internationale de récupérabilité 10

1.3 Objet du DORec 12

1.4 Périmètre des études du DORec 13

1.4.1 Conditions de sûreté 13
1.4.2 Optimisations 13
1.4.3 Situations non considérées 13
1.4.4 Durée de la récupérabilité 14

1.5 Livrables 15

2 Présentation du projet Cigéo 17

2.1 Déchets destinés à Cigéo 18

2.2 Phasage du projet Cigéo 20

2.3 Description du centre de stockage 21

2.3.1 Installations de surface de la zone descenderie 22
2.3.2 Installations de surface de la zone puits 24
2.3.3 Liaisons surface-fond 25
2.3.4 Installation souterraine 27

3 Démarche de récupérabilité sur Cigéo 39

3.1 Objectifs de récupérabilité de Cigéo 40

3.2 Fondements de la récupérabilité de Cigéo 40

3.3 Robustesse des conteneurs, des alvéoles et des équipements laissés en place dans les alvéoles après leur remplissage 40

3.3.1 Définition 40
3.3.2 Robustesse des conteneurs de stockage MA-VL 41
3.3.3 Robustesse des conteneurs de stockage HA 46
3.3.4 Robustesse des alvéoles 50
3.3.5 Équipements laissés en place dans les alvéoles après remplissage 54

3.4 Surveillance 59

3.4.1 Définition 59
3.4.2 Alvéoles MA-VL 60
3.4.3 Alvéoles HA 60

3.5 Équipements de retrait 61

3.5.1 Équipements de retrait des colis de stockage MA-VL 61
3.5.2 Équipements de retrait des colis de stockage HA 63
3.5.3 Programme d'essais de retrait 65
3.5.4 Essais de retrait de colis de stockage MA-VL sur banc d'essais 68

3.6 Aptitude à la déconstruction et à la remise en service des ouvrages de fermeture d'alvéole et de galerie de Cigéo 72
3.6.1 Introduction 72
3.6.2 Réouverture des galeries 74
3.6.3 Réouverture des alvéoles MA-VL 75
3.6.4 Réouverture des alvéoles HA0 79
3.6.5 Programme d'essais de déconstruction des ouvrages de fermeture 79
3.7 Dispositions conservatoires 81
3.7.1 Définition 81
3.7.2 Dispositions conservatoires dans la cellule de manutention des alvéoles MA-VL 82
3.7.3 Dispositions conservatoires dans les alvéoles HA 82
3.7.4 Dans les installations de surface 82
3.7.5 Synthèse des dispositions conservatoires 83
3.8 Dispositions d'exploitation 83
3.8.1 Introduction 83
3.8.2 Validation de la capacité à retirer les colis en situation industrielle 83
3.8.3 Contrôles 84
3.8.4 Gestion des informations 85
3.8.5 Synthèse des dispositions d'exploitation liées à la récupérabilité 85
3.9 Réévaluations périodiques de la récupérabilité 86

4 Scénarios de retrait étudiés 87

4.1 Définitions 88
4.1.1 La notion de scénario 88
4.1.2 Catégories de scénarios de retrait 89
4.2 Scénarios de retrait d'exploitation 90
4.2.1 Introduction 90
4.2.2 Retrait d'un colis de stockage remonté en surface 90
4.2.3 Retrait de colis transférés dans un autre alvéole 95
4.3 Scénario hypothétiques 100
4.3.1 Retrait de colis MA-VL contaminés 100
4.3.2 Non poursuite du projet Cigéo à l'issue de la phase pilote 100
4.3.3 Retrait complet et réexpédition de tous les colis d'un alvéole MA-VL 102
4.3.4 Retrait complet et réexpédition de toutes les familles HA0 102
4.3.5 Ouverture des galeries et des alvéoles scellés, retrait et réexpédition d'une famille MA-VL 103
4.3.6 Ouverture des galeries et des alvéoles scellés de toutes les familles de colis HA0, retrait complet et réexpédition 103

Annexes 104

Annexe 1 : Phasage général des essais préalables à la mise en service de Cigéo 105

Annexe 2 : Séquences d'opérations testées pour le retrait de colis 106

Références bibliographiques 107

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Niveaux de l'échelle internationale de récupérabilité (AEN)	11
Figure 2-1	Colis de déchets MA-VL	18
Figure 2-2	Colis de déchets HA	19
Figure 2-3	Schéma du phasage du développement de Cigéo	20
Figure 2-4	Phasage des tranches de construction de Cigéo	21
Figure 2-5	Localisation respective des installations de surface et de l'installation souterraine de Cigéo (sur la base des études d'APS) – (échelle non respectée pour raisons de lisibilité)	22
Figure 2-6	Perspective aérienne des installations nucléaires de surface (sur la base des études d'APS)	23
Figure 2-7	Dispositions respectives des installations d'EP1, EP2 et tête de descenderie (sur la base des études d'APS)	24
Figure 2-8	Schéma des périmètres géographiques de la zone puits (sur la base des études d'APS)	25
Figure 2-9	Transfert d'une hotte HA par funiculaire dans la descenderie colis (sur la base des études d'APS)	26
Figure 2-10	Organisation de l'installation souterraine (sur la base des études d'APS)	27
Figure 2-11	Vue de l'installation souterraine (sur la base des études d'APS)	28
Figure 2-12	Architecture du quartier MA-VL à terminaison (sur la base des études d'APS)	29
Figure 2-13	Alvéole MA-VL - Coupe longitudinale (sur la base des études d'APS)	30
Figure 2-14	Alvéole MA-VL - Coupe transversale en partie utile (sur la base des études d'APS)	31
Figure 2-15	Schéma d'un alvéole MA-VL obturé – exemple d'illustration présentant des scellements (sur la base des études d'APS)	32
Figure 2-16	Vue en plan du quartier HA0 (sur la base des études d'APS)	33
Figure 2-17	Schéma d'un alvéole HA0 avant remplissage (sur la base des études d'APS) le bouchon de radioprotection et les équipements de manutention ne sont pas représentés	34
Figure 2-18	Schéma de principe de drainage d'un alvéole HA0 (sur la base des études d'APS)	35
Figure 2-19	Vue de l'alvéole HA0 obturé avec galerie remblayée (sur la base des études d'APS)	36
Figure 2-20	Vue en plan des quartiers HA1/HA2 (sur la base des études d'APS)	36
Figure 3-1	Schéma de principe d'un colis de stockage MA-VL (sur la base des études d'APS)	43
Figure 3-2	Colis de stockage de déchets vitrifiés de type AVM biplace (sur la base des études d'APS)	48
Figure 3-3	Jeux fonctionnels dans l'alvéole MA-VL (sur la base des études d'APS)	51
Figure 3-4	Jeux fonctionnels dans l'alvéole HA (sur la base des études d'APS)	53
Figure 3-5	Détail des rails type Burbach laissés en alvéole de stockage (sur la base des études d'APS)	54
Figure 3-6	Vue du mur de radioprotection (sur la base des études d'APS)	55
Figure 3-7	Vue des intercalaires pour les alvéoles HA (sur la base des études d'APS)	56
Figure 3-8	Vue d'un alvéole HA1/HA2 muni d'intercalaires (sur la base des études d'APS)	57
Figure 3-9	Vue du bouchon de radioprotection et d'un système de fermeture envisagé pour les alvéoles HA ( ) (sur la base des études d'APS)	58

Figure 3-10	Equipements laissés en place en tête d'un alvéole HA0 à l'issue de son remplissage (le robot de fermeture est retiré) (sur la base des études d'APS)	58
Figure 3-11	Cellule de manutention MA-VL équipée des moyens de contrôle et de fixation de la contamination identifiés sous la légende « Equipements de retrait » dans cette illustration (sur la base des études d'APS)	62
Figure 3-12	Système à fourches télescopiques orientables (sur la base des études d'APS)	62
Figure 3-13	Hotte et robot tracteur (sur la base des études d'APS)	63
Figure 3-14	Test de récupérabilité sur 100m d'un conteneur HA dans un alvéole fortement déformé à l'aide du « robot pousseur ESDRED »	66
Figure 3-15	Banc d'essais de récupérabilité de niveau II des conteneurs HA (température, humidité)	67
Figure 3-16	Récupération de la maquette de colis de stockage et accumulation de rouille en tête d'alvéole	68
Figure 3-17	Chariot utilisé pour les essais de retrait de maquettes de colis de stockage MA-VL	69
Figure 3-18	Déplacement possible des colis en position latérale (vue de dessus)	70
Figure 3-19	Déplacement possible des colis en position centrale (vue de dessus)	70
Figure 3-20	Configuration pour la mesure d'orientation du colis (sur la base des études d'APS)	71
Figure 3-21	Fourche au sein de son logement dans le colis (sur la base des études d'APS)	72
Figure 3-22	Localisation des scellements de galerie - représentés par des cercles (sur la base des études d'APS)	74
Figure 3-23	Structure d'un scellement dans une galerie (sur la base des études d'APS)	74
Figure 3-24	Schématisation du système de marinage combiné à une bande transporteuse (sur la base des études d'APS)	75
Figure 3-25	Principe de dispositif de contrôle de l'atmosphère en alvéole MA-VL (sur la base des études d'APS)	77
Figure 3-26	Schématisation d'une réouverture par forage côté galerie de retour d'air (sur la base des études d'APS)	78
Figure 3-27	Principe de construction du scellement FSS	80
Figure 3-28	Carottage et sciage du massif d'appui en béton bas pH du scellement FSS	81
Figure 3-29	Équipements de contrôle et de traitement de la contamination – exemple d'un colis CS1-5 (sur la base des études d'APS)	82
Figure 3-30	Localisation des réserves d'emprise foncière en surface pour la récupérabilité (sur la base des études d'APS)	83
Figure 4-1	Représentation schématique de la notion de scénario	88
Figure 4-2	Logigramme de retrait d'un colis de stockage MA-VL (sur la base des études d'APS)	92
Figure 4-3	Logigramme de retrait d'un colis de stockage HA0 (sur la base des études d'APS)	94
Figure 4-4	Logigramme de retrait d'un conteneur MA-VL vers autre alvéole (sur la base des études d'APS)	96
Figure 4-5	Logigramme de retrait d'un conteneur HA-VL d'un alvéole et transfert vers un autre alvéole (sur la base des études d'APS)	99
Figure 4-6	Cigéo à l'horizon 2035 (sur la base des études d'APS)	101
Figure 4-7	Schéma du phasage global des opérations pour le démarrage de Cigéo	105

1

Introduction

1.1 Contexte 8
1.2 Définitions 8
1.3 Objet du DORec 12
1.4 Périmètre des études du DORec 13
1.5 Livrables 15

1.1 Contexte

La Commission nationale du débat public (CNDP) a organisé un débat public sur le projet Cigéo du 15 mai au 31 juillet 2013 et du 1er septembre au 15 décembre 2013. Le compte rendu et le bilan du débat public ont été publiés le 12 février 2014, avec l'avis de la Conférence de citoyens organisée par la CNDP (1) (2) (3).

Le 5 mai 2014, le Conseil d'administration de l'Andra s'est réuni pour délibérer sur les suites à donner au débat public sur le projet Cigéo (4). Il a notamment prévu, en amont de la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo, et pour préparer son instruction, la transmission à l'Etat d'un ensemble de livrables constitué d'une proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo (5), du dossier d'options de sûreté (6) (7) et du dossier d'options techniques de récupérabilité.

Afin de prendre en compte dans la DAC les demandes issues de l'instruction de ces livrables par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), leur évaluation par la commission nationale d'évaluation (CNE) et les résultats de la concertation avec les parties intéressées et pour pouvoir y intégrer l'ensemble des études de conception, le dépôt de la DAC est actuellement prévu en 2018.

Le présent document constitue le dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec) prévu par la délibération du 5 mai 2014. Il a été produit sur la base des études d'avant-projet sommaire (APS) de Cigéo menées par l'Andra jusqu'à fin 2015. Les éléments techniques (architectures, plans, définitions techniques des équipements, optimisations…) et les données chiffrées qui y sont présentés sont susceptibles d'évoluer en phase d'avant-projet définitif (APD) et au-delà, en fonction des études, des demandes de l'ASN, des évaluations de la CNE et des échanges à mener avec les parties intéressées.

1.2 Définitions

1.2.1 Stockage et entreposage

La loi du 28 juin 2006 (8) définit le stockage des déchets radioactifs comme « *l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive* […] ». La directive européenne du 19 juillet 2011 (9) définit le stockage comme « *le dépôt de combustible usé ou de déchets radioactifs dans une installation sans intention de retrait ultérieur* ». Elle rejoint la définition du stockage définitif donnée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), à savoir « *la mise en place de déchets radioactifs dans une installation ou un emplacement sans intention de les récupérer* » (10).

La loi du 28 juin 2006 (8) définit l'entreposage de matières ou de déchets radioactifs comme « *l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer* ». Cette définition est équivalente à celles données par la directive européenne et par l'AIEA (9) (10).

La notion de stockage se distingue donc de la notion d'entreposage par son caractère potentiellement définitif et par l'absence d'intention de récupérer les déchets stockés, au moment où ils sont stockés. A cet égard, les déchets de l'inventaire de référence de Cigéo sont des déchets ultimes, c'est-à-dire « *qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux* » (Article L542-1-1 du Code de l'environnement).

Toutefois, dans le cadre de la réversibilité et des choix qu'elle offre en matière de gestion des déchets radioactifs, l'éventualité que, sur la durée d'ordre séculaire de l'exploitation de Cigéo, les générations futures aient la volonté de retirer tout ou partie des colis de déchets stockés est envisagée.

1.2.2 Réversibilité et récupérabilité

S'agissant de la réversibilité et de la récupérabilité, le Conseil d'administration de l'Andra a proposé les définitions suivantes (4) :

- **réversibilité** : capacité à offrir à la génération suivante des choix sur la gestion à long terme des déchets radioactifs, incluant notamment le scellement d'ouvrages de stockage ou la récupération de colis de déchets ; cette capacité est notamment assurée par un développement progressif et flexible du stockage ;
- **récupérabilité** : capacité à retirer des colis de déchets stockés en formation géologique profonde.

Début 2016, l'Andra a publié une note de positionnement sur la réversibilité dans laquelle elle explicite comment le principe de réversibilité est au cœur de la conception de Cigéo (11). Par ailleurs, les possibilités de mise en œuvre pratique de la réversibilité sont précisées dans la proposition de plan directeur d'exploitation (PDE) de Cigéo (cf. § 4 de la proposition de PDE) (5).

La réversibilité s'appuie sur des outils de gouvernance (amélioration continue des connaissances ; transparence et transmission des informations et des connaissances ; participation de la société, évaluation et supervision par le Parlement ; contrôle par l'Autorité de sûreté nucléaire) et sur des outils techniques de conduite du projet (développement incrémental et progressivité de la construction, flexibilité de l'exploitation, adaptabilité des installations, récupérabilité) (5) (11).

Les choix offerts à la génération suivante par les outils de conduite du projet pour la gestion à long terme des déchets radioactifs sont de natures diverses. Ils peuvent porter sur l'accélération ou la temporisation de la construction de Cigéo et sur les rythmes de stockage des colis de déchets et de fermeture partielle ou définitive du stockage. Ils peuvent également porter sur la prise en charge d'autres déchets que ceux figurant dans l'inventaire de référence, par exemple le stockage de combustibles usés, si ceux-ci n'étaient plus considérés comme valorisables. Les études techniques de l'Andra relatives au stockage des combustibles dans Cigéo font l'objet d'un rapport spécifique produit dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (12) (13).

La réversibilité offre des choix aux générations futures en termes de gestion des déchets radioactifs. La récupérabilité est un des outils de la réversibilité. Elle ne constitue pas une fin en soi. Elle n'a de sens qu'associée aux autres outils de la réversibilité, en particulier la flexibilité de l'exploitation et l'amélioration continue des connaissances rendue possible par l'exploitation de Cigéo et par la poursuite des programmes de recherches et de développement (R&D) relatifs à la gestion des déchets.

La récupérabilité et la flexibilité de l'exploitation offrent de la souplesse à l'exploitant. Il peut ainsi retirer de façon ponctuelle un ou quelques colis des alvéoles en cours de remplissage, sans perturber significativement les flux de stockage. Ces opérations seront éventuellement utiles pour des vérifications, des essais ou des réorganisations des alvéoles. Les colis de déchets seront ensuite remis en alvéole. Ces opérations sont couvertes par les scénarios de retrait dits « d'exploitation » étudiés dans le présent DORec (cf. § 4.1.2.1). L'autorisation de mener dans Cigéo les opérations des scénarios de retrait d'exploitation sera demandée dans le cadre de la DAC prévue en 2018.

La récupérabilité et l'amélioration continue des connaissances pourraient amener les générations futures à décider de retirer de Cigéo tout ou partie des colis de déchets stockés, par exemple pour les orienter vers d'autres filières de gestion des déchets. Ces opérations sont couvertes par les scénarios de retrait dits « hypothétiques » étudiés dans le présent DORec (cf. § 4.1.2.2). Dans ces scénarios, l'hypothèse est systématiquement faite que les colis sont réexpédiés hors de Cigéo, vers la filière alternative de gestion choisie. Aucun entreposage n'est envisagé dans Cigéo pour la gestion des colis qui seraient éventuellement retirés dans le cadre d'un scénario de retrait de type « hypothétique » ; seul un entreposage dit « tampon », par nature limité en durée et en volume, serait éventuellement nécessaire pour faciliter la logistique et s'adapter aux variations des flux d'expédition. Pour l'étude des scénarios hypothétiques, il n'est pas nécessaire d'identifier le site de destination des colis retirés. En effet, une telle décision de changement du mode de gestion des déchets HA ou MA-VL serait prise au niveau national, en tenant compte de la disponibilité des moyens de transport et de gestion alternative des déchets retirés. Le choix du site industriel désigné pour cette gestion alternative n'a pas d'influence sur l'étude de la récupérabilité de Cigéo.

Notre génération concevant Cigéo pour y stocker les déchets, sans l'intention de les en retirer ultérieurement pour les orienter vers une autre filière de gestion, l'autorisation de mettre en œuvre dans Cigéo les opérations des scénarios de retrait hypothétiques ne sera pas demandée dans la DAC en 2018. Cette autorisation serait à demander par la génération qui en aurait pris la décision. A cet égard, il faut souligner qu'une telle décision de retrait devrait se fonder notamment sur une analyse de la sûreté à long terme de la filière de gestion alternative retenue pour les déchets retirés et être justifiée par un éventuel bénéfice sur ce plan.

Le financement des études pour la conception de Cigéo, de sa construction et de sa fermeture sont assurés dès aujourd'hui par les générations actuelles. L'objectif est de ne pas reporter le coût de Cigéo sur les générations futures. Cela est fait par des provisions, régulièrement actualisées, par EDF, le CEA et AREVA, les trois producteurs de déchets concernés. Le coût des dispositions techniques prises pour favoriser la réversibilité, décrites dans le présent DORec, est intégré au projet. Les générations actuelles favorisent ainsi des possibilités et des facilités d'action sur le processus de stockage. Toutefois, les générations qui décideraient d'exercer ces options, par exemple pour retirer des colis de Cigéo, auraient bien sûr à supporter la charge de leurs décisions (dans cet exemple en finançant les opérations de retrait elles-mêmes : exploitation, remise en fonctionnement d'équipements…).

1.2.3 Echelle internationale de récupérabilité

Pour permettre la mise en sécurité définitive des déchets, le stockage est conçu pour être fermé. Les étapes de fermeture de Cigéo et leur planning prévisionnel de mise en œuvre sont décrits dans le déroulement de référence du projet présenté dans la proposition de PDE (5). Les principes et les options de sûreté retenues pour les opérations de fermeture sont décrits dans le dossier d'options de sûreté (6). La description de l'installation fermée partiellement est brièvement reprise aux chapitres 2.3.4 et 3.6 du présent document.

En pratique, les opérations de fermeture consistent à démonter des équipements d'exploitation et à construire des ouvrages, complémentaires de la barrière géologique, permettant d'assurer le bon fonctionnement du stockage après fermeture, c'est-à-dire permettant d'assurer sa sûreté de façon passive, sans nécessiter d'action humaine. En contrepartie de ces avancées vers une sûreté passive, chaque opération de fermeture augmente le degré d'effort à mettre en œuvre pour un éventuel retrait de colis de déchets.

L'échelle internationale de récupérabilité (14) élaborée par l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE) décline la capacité à retirer les colis de déchets en tenant compte des étapes de fermeture plus ou moins partielle envisageables pour une installation de stockage.

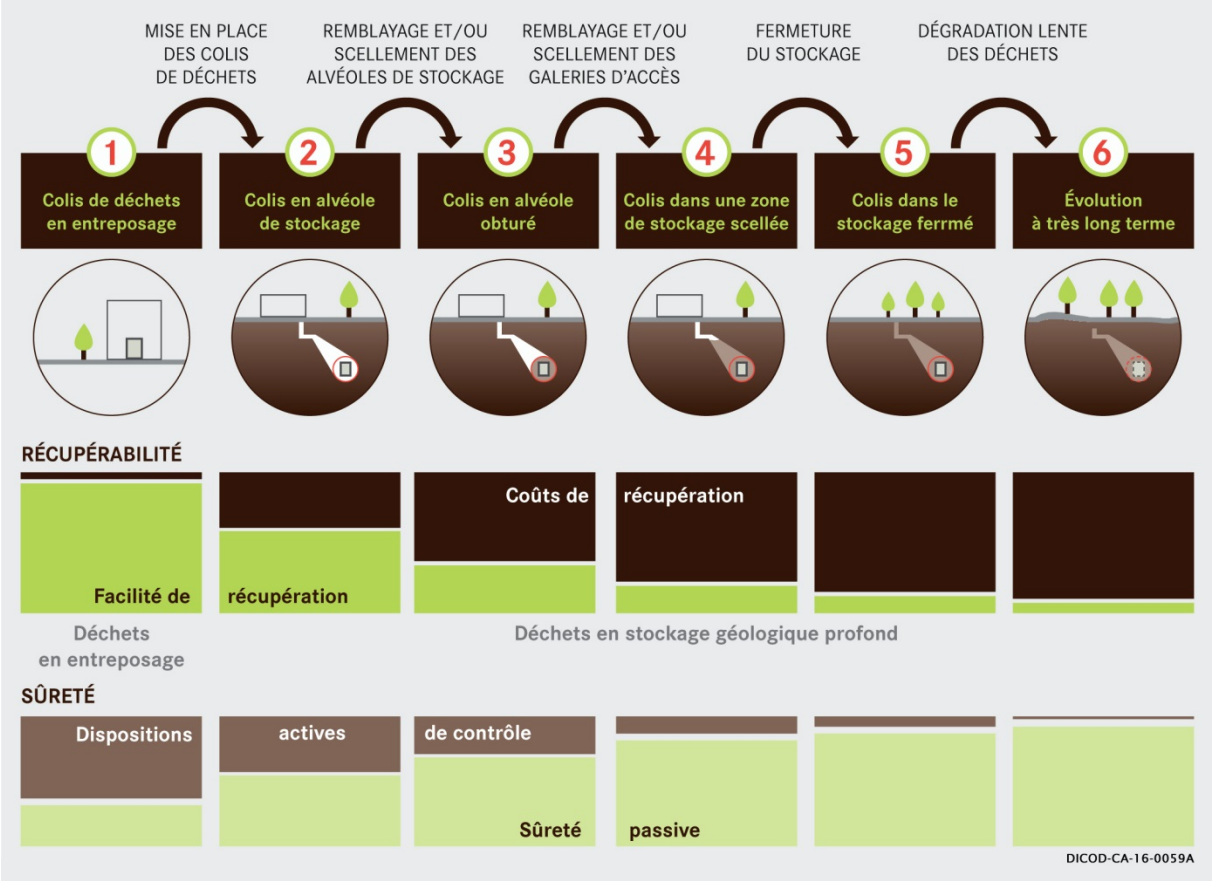


Figure 1-1 Niveaux de l'échelle internationale de récupérabilité (AEN)

L'échelle de l'AEN présente 6 niveaux, dont les durées possibles peuvent varier suivant les programmes nationaux. De même, la définition du positionnement exact des transitions entre les niveaux est du ressort de chaque programme national.

Son premier niveau est associé à l'entreposage qui précède le stockage des colis de déchets et qui présente une récupérabilité maximale en fonctionnement normal. Le dernier niveau correspond à l'installation de stockage ayant évolué à très long terme après sa fermeture. Le passage d'un niveau au suivant marque le franchissement d'une étape augmentant progressivement le degré d'effort nécessaire à la mise en œuvre d'une opération de retrait.

Les franchissements des niveaux de récupérabilité sont les suivants :

- passage du niveau 1 au niveau 2 : mise en place de colis de déchets dans l'alvéole de stockage. On dit que l'alvéole se trouve au niveau 2 dès qu'elle contient un premier colis de stockage contenant des déchets ;
- passage du niveau 2 au niveau 3 : mise en place des ouvrages de fermeture de l'alvéole. Le niveau 3 correspond au premier niveau de fonctionnement passif de l'alvéole. En pratique, le passage du niveau 2 au niveau 3 est effectif au moment où les dispositifs d'extraction des fluides (gaz ou eau) sont rendus inopérants (arrêt de la possibilité de ventilation ou de soutirage d'éventuelles venues d'eau) ;
- passage du niveau 3 au niveau 4 : remblayage et scellement des galeries permettant d'accéder aux alvéoles ;
- passage du niveau 4 au niveau 5 : remblayage et scellement des puits et des descenderies jusqu'à la surface ;
- passage du niveau 5 au niveau 6 : lente évolution à long terme du stockage impliquant une dégradation progressive des colis de déchets.

L'échelle de récupérabilité de l'AEN est utilisée par l'Andra comme base pour la description des étapes successives d'exploitation et de fermeture de Cigéo. Le terme « fermeture partielle » désigne les

opérations de passage aux niveaux 3 et 4. Le terme « fermeture définitive » désigne les opérations de passage au niveau 5. En France, conformément aux dispositions législatives actuelles, seule une loi pourra les autoriser (8).

1.3 Objet du DORec

Dans ses propositions relatives à la réversibilité du projet Cigéo formulées en 2012 (15) et dans le dossier de maître d'ouvrage du débat public (16), l'Andra a indiqué que Cigéo était conçu pour permettre la récupération des colis de déchets qui y seront stockés. Dans la délibération du 5 mai 2014 (4), le Conseil d'administration de l'Andra a confirmé que, pour élaborer la demande d'autorisation de création de Cigéo, les études de conception de Cigéo seraient poursuivies *« avec l'objectif de laisser la possibilité, pendant la période d'exploitation d'une centaine d'années, de retirer les colis de déchets stockés »*. Le présent DORec a pour objectif de présenter, au stade actuel du projet, les principales options techniques permettant d'assurer le retrait des colis de déchets stockés dans Cigéo.

Le DORec comporte au chapitre 2 une présentation d'ordre général du projet Cigéo qui explicite son fonctionnement et identifie les équipements liés au retrait.

Les options techniques associées à la récupérabilité, retenues sur la base des études d'APS, sont présentées au chapitre 3. Celles-ci recouvrent des dispositions de conception robustes des composants du stockage et de ses équipements, ainsi que des dispositions d'exploitation, notamment en termes de surveillance. Elles sont complétées par la description des essais menés dans le cadre du développement des équipements de retrait et des modalités de déconstruction des ouvrages de fermeture. Ces essais continueront d'être menés à différents stades du développement du projet, en particulier *in situ* dans Cigéo au cours de la phase industrielle pilote. L'Andra précisera en 2018, dans le dossier de DAC, les étapes successives de développement de l'ensemble des composants et des équipements jouant un rôle dans la récupérabilité et les bilans qui seront établis à ce titre.

Enfin, l'Andra a étudié différents types de scénarios de retrait positionnés à différentes phases du développement de Cigéo, y compris après fermeture partielle de certaines parties de l'installation. Les résultats des études des différents scénarios sont présentés au chapitre 4 du présent document. L'objectif de ces études est d'identifier les opérations élémentaires nécessaires à la mise en œuvre de ces scénarios afin de vérifier qu'elles sont possibles et compatibles avec le dimensionnement de l'installation. Le niveau de détail de l'analyse est adapté à la nature des scénarios, à leur échelonnement prévisible dans le temps et aux conditions de fonctionnement de l'installation auxquelles ils correspondent (exploitation ou après fermeture partielle). Pour les scénarios hypothétiques, non programmés dans le déroulement de référence décrit dans la proposition de PDE (5), l'étude du présent DORec se limite à préciser les conditions opérationnelles et à identifier les fonctionnalités qui seraient à ajouter à Cigéo.

1.4 Périmètre des études du DORec

1.4.1 Conditions de sûreté

Conformément aux propositions en matière de réversibilité formulées par l'Andra en 2012 (15), les opérations de retrait des colis devront être conduites dans le respect des objectifs de sécurité, de sûreté nucléaire et de protection de l'environnement applicables à l'exploitation de Cigéo.

Dans cette optique, le vieillissement attendu des composants, notamment des conteneurs de stockage, est pris en compte en amont, dans leur dimensionnement, pour les rendre robustes aux différentes sollicitations qu'ils recevront sur toute la durée de l'exploitation du stockage.

Si nécessaire, en fonction de la date à laquelle un éventuel retrait serait mis en œuvre (obsolescence de certains équipements) et de l'état de fermeture plus ou moins partiel de l'installation, des opérations de rééquipement ou de remise en conformité seront entreprises en préalable à l'engagement des opérations de retrait (jouvence, remplacement ou modernisation d'équipements). En conséquence, les opérations des scénarios de retrait présentés dans le présent DORec sont réalisées dans une installation conforme, présentant, au moment du retrait, des performances (industrielles et de sûreté) équivalentes à celles prévues pour la mise en place des colis de déchets.

1.4.2 Optimisations

Le DORec ne présente pas d'options techniques anticipant les résultats des études d'optimisation étudiées par l'Andra dans le cadre du développement incrémental de Cigéo décrit dans la proposition de PDE (5). La conception de Cigéo est compatible avec l'intégration de ces optimisations, une fois que celles-ci auront atteint le niveau de maturité technologique satisfaisant. Elles ne pourront être mises en œuvre de façon opérationnelle que s'il est démontré qu'elles sont compatibles avec les objectifs de Cigéo, notamment en matière de récupérabilité.

Les optimisations identifiées à l'issue des études d'APD seront présentées dans la DAC, associées à des propositions de rendez-vous d'autorisation, à des bilans de présentation des éléments de démonstration attendus, ainsi qu'à des échéances prévisionnelles de mise en œuvre.

1.4.3 Situations non considérées

La récupérabilité est un des outils de la réversibilité. Elle est associée à des composants, des équipements et des fonctions qui offrent de la souplesse à l'exploitant de Cigéo et des options de gestion des déchets radioactifs aux générations futures. En revanche, la récupérabilité n'a pas pour finalité et principe la gestion de situations incidentelles ou accidentelles, en écart par rapport aux évolutions prévisibles du stockage.

A cet égard, en lien avec le dimensionnement de l'installation, il n'a pas été identifié d'évolution phénoménologique de Cigéo qui obligerait sur la durée d'exploitation d'ordre séculaire du stockage, à fermer ou inversement à laisser ouvert, voire à retirer les colis stockés pour garantir la sûreté.

Les dates de fermeture du déroulement de référence du projet sont présentées dans la proposition de PDE (5). Elles ont été retenues car elles constituent, à ce stade, un optimum pour répondre aux objectifs de préservation de la sûreté après-fermeture et en exploitation, de limitation de la perturbation des flux de mise en stockage, de surveillance, d'acquisition progressive d'expérience sur les opérations de fermeture, de récupérabilité et d'optimisation (5). Elles seront réévaluées périodiquement, notamment lors des mises à jour de la proposition de PDE. La flexibilité de Cigéo offre ainsi la possibilité aux générations futures de modifier le schéma de fermeture du déroulement de référence.

Le DORec ne traite donc pas de scénarios de retrait des colis en situations incidentelle ou accidentelle ou en situation post-accidentelle. Ce positionnement est conforme à la position Andra décrite en 2012 dans les propositions de l'Andra en matière de réversibilité (15) : « *Dans l'hypothèse d'un accident affectant le stockage, l'installation doit d'abord être rapidement replacée dans un état sûr (maintien ou rétablissement des fonctions de sûreté : protection des opérateurs contre l'exposition au rayonnement, confinement, évacuation des gaz…). Cette mise en sécurité […] ne repose pas sur une opération de retrait de colis. Une fois la mise en sécurité réalisée, l'exploitant examinera les dispositions à mettre en œuvre pour pérenniser la sûreté de l'installation et poursuivre ou reprendre son exploitation normale. Le retrait de colis constitue dans ce cadre l'une des réponses possibles à une situation post-accidentelle, sans pour autant devoir être envisagé systématiquement. Le maintien en stockage de colis, même endommagés, ou leur éventuelle récupération sera décidé au regard de la sûreté en exploitation et à long terme du stockage* ». Le traitement des situations incidentelles, accidentelles et post-accidentelles relève du dossier d'options de sûreté (6). A cet égard, dans la pratique, les opérations d'assainissement entreprises suite à un incident ou à un accident ayant affecté une installation nucléaire sont principalement liées à la poursuite d'objectifs de sûreté à moyen et long terme ou de remise en fonctionnement industriel, sans lien avec le caractère initialement plus ou moins réversible de l'installation concernée.

1.4.4 Durée de la récupérabilité

La récupérabilité est associée à des dispositions techniques dont la performance est justifiable sur la durée d'ordre séculaire prévue pour l'exploitation du stockage. Au-delà, des opérations sont possibles, mais il ne serait pas réaliste de s'engager techniquement dans une démonstration sur leurs conditions de faisabilité. La récupérabilité des colis de déchets après la fermeture définitive (au-delà du niveau 5 de l'échelle internationale de récupérabilité) n'est pas étudiée dans le présent DORec.

A cet égard, l'ASN considère, dans son avis du 1er février 2006, que « *sur le plan des principes* […] *la réversibilité ne peut avoir qu'une durée limitée. En effet, l'accessibilité aisée aux colis de déchets doit être limitée dans le temps*… ». Toutefois, même au-delà de la période prévue, les dispositions prises en conception facilitent toujours la récupérabilité (jeux fonctionnels, robustesse des composants du stockage). Si les générations suivantes veulent repousser la fermeture définitive au-delà de la période envisagée (vers 2150), elles le pourront, à condition de prendre les mesures nécessaires. L'amélioration continue des connaissances et la surveillance de Cigéo permettront à ce titre de réévaluer périodiquement la longévité prévisionnelle de l'installation.

La loi du 28 juin 2006 (8) dispose que seule une loi peut autoriser la fermeture dite « définitive » de Cigéo (passage au niveau 5 de l'échelle de récupérabilité). Dans le PDE, cette fermeture est actuellement prévue à l'horizon 2150. L'engagement des travaux de fermeture définitive marque la fin de la période de réversibilité de Cigéo. Pour autant, le passage au niveau 5 ne marque pas l'annulation soudaine de la capacité à retirer les colis de Cigéo. Certaines dispositions passives prises en conception (robustesse des colis, jeux fonctionnels…) perdurent au-delà des opérations de fermeture définitive pendant des dizaines, voire des centaines d'années. De même, les données relatives aux colis et à leur emplacement dans Cigéo resteront disponibles aussi longtemps que les archives seront conservées et constitueront une aide précieuse pour préparer une éventuelle opération de retrait. Toutefois, au-delà de l'affirmation du principe qu'il ne sera jamais « impossible » de retirer les colis de déchets de Cigéo, même dégradés, et que la capacité de retrait découle toujours du degré d'effort et d'investissement que la société sera prête à mobiliser pour ces opérations (coût financier, risques), il n'est pas possible, à ce stade du projet et compte tenu des échéances lointaines envisagées, de présenter une analyse technique fondée d'un scénario de retrait après la fermeture définitive de l'installation.

1.5 Livrables

Le DORec fait partie d'un ensemble de livrables produits sur la base des études d'APS du projet Cigéo. Il s'agit :

Documents en lien avec la sûreté

- du dossier d'options de sûreté - partie exploitation (DOS-Expl) qui présente les principales options retenues pour assurer la sûreté des opérations menées dans Cigéo pendant son exploitation (depuis la réception des colis, jusqu'à leur stockage) et de premières analyses de sûreté (6) ;
- du dossier d'options de sûreté – partie après fermeture (DOS-AF) qui présente les objectifs, principes et fonctions de sûreté prévues pour assurer la sûreté du stockage après sa fermeture, les incertitudes associées et de premières évaluations de sûreté à long terme du stockage (7) ;
- les spécifications préliminaires d'acceptation des colis de déchets qui présentent les conditions que doivent respecter les colis pour être autorisés à être stockés dans Cigéo (17) ;
- l'esquisse de la notice présentant les capacités techniques de l'exploitant due pour la demande d'autorisation de création (18) ;

Documents en lien avec la réversibilité

- la proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo qui décrit l'inventaire de référence du projet Cigéo et son déroulement de référence, ses modalités de démarrage par une phase industrielle pilote du projet et les possibilités offertes par les outils de conduite du projet définis dans le cadre de la réversibilité (5) ;
- l'étude de l'adaptabilité de Cigéo à l'éventuel stockage des combustibles qui présente les éléments techniques associés à la prise en charge de colis contenant des combustibles (12) ;
- l'étude de l'adaptabilité de Cigéo à l'éventuel stockage des déchets en réserve qui présente les éléments techniques associés à la prise en charge de colis de déchets FA-VL (19).

L'ensemble de ces documents fera l'objet d'une instruction par l'ASN. Les demandes de l'ASN seront prises en compte pour l'élaboration de la demande d'autorisation de création (DAC).

La proposition de PDE fera l'objet d'une concertation avec les parties intéressées.

2

Présentation du projet Cigéo

2.1 Déchets destinés à Cigéo 18
2.2 Phasage du projet Cigéo 20
2.3 Description du centre de stockage 21

2.1 Déchets destinés à Cigéo

Cigéo est conçu pour stocker des déchets dont le niveau de radioactivité et la durée de vie ne permettent pas de les stocker, de manière sûre à long terme, en surface ou à faible profondeur. Ces déchets recouvrent les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et les déchets de haute activité (HA). Ils proviennent principalement du secteur de l'industrie électronucléaire et des activités de recherche associées, ainsi que, dans une moindre mesure, des activités liées à la Défense nationale. L'inventaire des colis de déchets à stocker dans Cigéo (types, quantités, volumes) et leurs modalités de livraison vers Cigéo constituent des données essentielles pour la conception et l'exploitation du Centre. L'inventaire de référence de Cigéo est présenté dans la proposition de PDE (5). La description technique des colis de déchets de l'inventaire de référence est présentée dans le dossier d'options de sûreté (6).

Les déchets sont reçus sur Cigéo sous forme de colis de déchets conditionnés. Plusieurs modes de conditionnement sont mis en œuvre suivant la nature des déchets (vitrification, cimentation, bitumage, compactage…).[1] Le conditionnement des déchets, effectué sur les sites d'AREVA, du CEA et d'EdF, consiste à les solidifier et à les immobiliser sous une forme non dispersable et à les placer dans un conteneur conçu pour en faciliter la manutention, l'entreposage, le transport et le stockage.

Les déchets MA-VL sont de nature variée. Il s'agit :

- de résidus issus des combustibles nucléaires irradiés après traitement ;
- de composants ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires ;
- de déchets technologiques issus de la maintenance des installations nucléaires, de laboratoires, d'installations liées à la Défense nationale et du démantèlement de ces différentes installations.

Figure 2-1 Colis de déchets MA-VL

[1] Lorsqu'ils sont produits, les déchets radioactifs se trouvent sous forme brute, gazeuse, liquide ou solide. Pour pouvoir gérer ces déchets, il est nécessaire de les conditionner, c'est-à-dire de fabriquer des « colis de déchets ». Le conditionnement peut être défini comme l'ensemble des opérations consistant à introduire ces déchets, éventuellement traités au préalable, dans un conteneur, où ils peuvent être incorporés ou non dans un matériau d'enrobage, pour former un colis de déchets.

Les déchets HA correspondent principalement à des résidus hautement radioactifs issus des combustibles nucléaires irradiés après traitement. Ceux-ci sont incorporés dans une pâte de verre et coulés dans un colis en inox dont le couvercle est soudé. On distingue les colis HA0, peu thermiques, des colis HA1 et HA2 dont la puissance thermique est plus importante (jusqu'à plusieurs centaines de W par colis).

Figure 2-2 Colis de déchets HA

Les colis de déchets à stocker dans Cigéo sont, pour une part, déjà produits et entreposés sur les sites des producteurs de déchets en attente d'expédition ; ils sont dénommés colis primaires.

Avant stockage, les colis primaires sont introduits dans des conteneurs de stockage. L'ensemble constitué du colis primaire et du conteneur de stockage est dénommé colis de stockage. La possibilité de stocker certaines familles de colis primaires MA-VL sans ajout d'un conteneur de stockage est étudiée ; dans ce cas, c'est le colis primaire qui est considéré en l'état comme un colis de stockage (familles dites éligibles au stockage « direct »). Cette possibilité fait partie des optimisations de Cigéo identifiées sur la base des études d'APS (5). Elle ne change pas les principes et les options sur lesquelles est fondée la récupérabilité, les fonctions du conteneur de stockage étant dans ce cas affectées au colis primaire mis en stockage.

2.2 Phasage du projet Cigéo

Le projet Cigéo se développe selon les phases temporelles successives suivantes :

- la ***conception initiale*** de l'installation (études d'esquisse, études d'avant-projet sommaire, études d'avant-projet définitif, études projet et études d'exécution) (20), phase pendant laquelle les ouvrages, bâtiments et procédés de l'installation sont définis techniquement. C'est la phase dans laquelle le projet se situe actuellement. La conception de Cigéo fait l'objet d'évaluations régulières (ASN, Commission nationale d'évaluation, revues industrielles). Elle inclut le dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC) en 2018. Pendant la phase de conception initiale, des premiers travaux sur le site, notamment des diagnostics (archéologie préventive, géotechnique, reconnaissance, préparation aux travaux, installations supports hors périmètre) peuvent être menés ;
- la ***construction initiale*** de Cigéo pendant laquelle une première partie, ou première « tranche[2] », de l'installation est réalisée. Elle porte principalement, sous réserve que Cigéo soit autorisé, sur la construction des bâtiments de surface liés à l'exploitation de l'installation nucléaire de surface, les liaisons surface-fond, ainsi que les ouvrages souterrains permettant de recevoir de premiers colis de déchets. Pendant la construction initiale (en fonction du planning des travaux), des études d'exécution des composants et des équipements sont menées jusqu'à leur réalisation effective ;
- l'***exploitation*** qui se déroule pendant une centaine d'années et au cours de laquelle ont lieu simultanément des opérations de réception et de mise en stockage de colis et des travaux d'extension de l'installation souterraine, par tranches successives, afin de poursuivre la réception des colis de l'inventaire. L'exploitation démarre après l'autorisation de mise en service délivrée par l'ASN (réception de premiers colis de déchets radioactifs utilisés pour des essais actifs). L'exploitation comporte également, sous réserve d'autorisation, des travaux de fermeture partielle (réalisation d'ouvrages de fermeture des alvéoles et des zones de stockage). De plus, des travaux de construction, d'adaptation et de jouvence des bâtiments en surface sont engagés. Pendant l'exploitation de Cigéo, les études sont poursuivies pour améliorer sa conception, notamment pour l'optimisation des tranches successives ;
- sous réserve de son autorisation par une loi, la fermeture définitive de Cigéo et la déconstruction des installations de surface. Cigéo entre dans sa ***phase de surveillance***.

Les jalons prévisionnels d'autorisation et de mise en œuvre de Cigéo sont décrits dans la proposition de PDE (5).

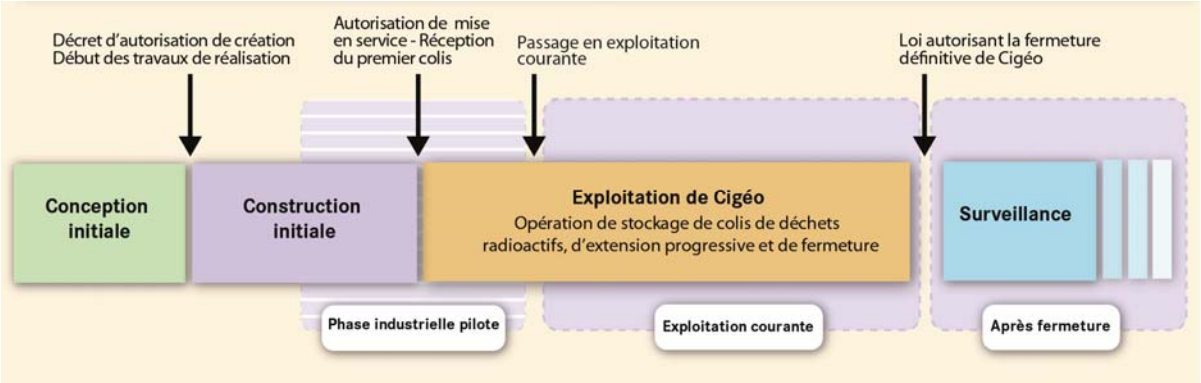


Figure 2-3 Schéma du phasage du développement de Cigéo

Une ***phase industrielle pilote*** est prévue au démarrage de Cigéo. Elle débute pendant la construction initiale et se poursuit au début de son exploitation. Elle comporte des opérations en « inactif », notamment des essais sur les équipements installés, ainsi que des opérations en « actif », c'est-à-dire en présence de colis de déchets. Les objectifs de la phase industrielle pilote sont définis dans la proposition de PDE (5). Ils comportent notamment des essais permettant de conforter, en conditions réelles, la capacité à retirer les colis de déchets stockés dans Cigéo.

[2] Une tranche correspond à un ensemble de bâtiments de surface et/ou d'ouvrages souterrains construits en engageant une tranche d'investissement, c'est-à-dire une partie du coût global de possession.

L'exploitation de Cigéo est prévue pour plus de 100 ans. Sur cette durée, le développement de ses installations sera mené de façon graduelle, par tranches d'investissement, qui seront mises en service successivement. Par convention la construction initiale est dénommée « Tranche 1 » (T1), la suivante « Tranche 2 » (T2) et ainsi de suite jusqu'à la réalisation complète du stockage.

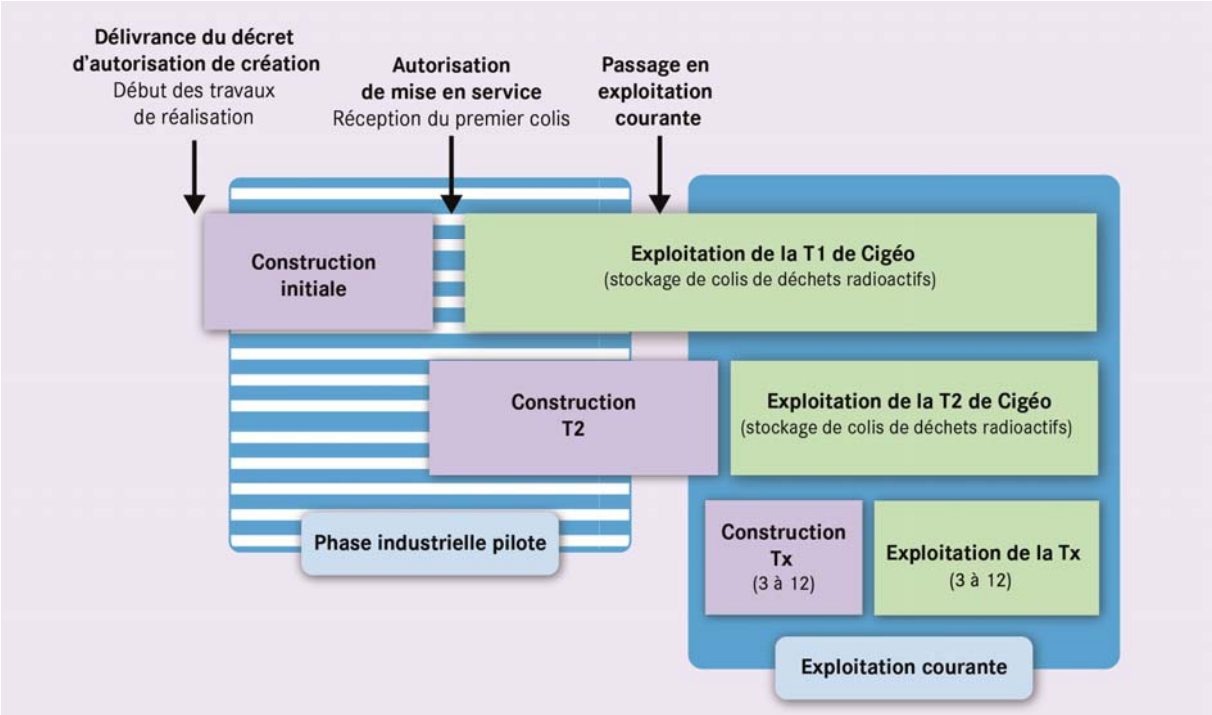


Figure 2-4 Phasage des tranches de construction de Cigéo

Jusqu'à la construction de la dernière tranche d'ouvrages souterrains de Cigéo, la partie souterraine comportera une partie en exploitation nucléaire et une partie « travaux » dans laquelle se dérouleront les chantiers de construction des nouveaux alvéoles.

La durée d'exploitation prévue implique que la conception des installations permette d'intégrer des évolutions, notamment pour bénéficier du retour d'expérience apporté par les premières tranches mises en service et des progrès scientifiques et techniques à l'échelle de plusieurs décennies. Au cours du temps et du perfectionnement des techniques, leur conception pourra être modifiée, sous réserve d'autorisation (cf. § 1.4.2 du présent document).

Conformément au déroulement de référence du projet Cigéo décrit dans la proposition de PDE, les premières opérations de fermeture d'alvéoles et de galeries du quartier HA0 débutent à l'horizon 2070 et les premières opérations de fermeture d'alvéoles et de galeries du quartier MA-VL débutent à l'horizon 2100. La fermeture des alvéoles et des galeries HA1/HA2 est prévue à l'horizon 2145. La fermeture définitive, que seule une loi pourra autoriser est prévue à l'horizon 2150.

2.3 Description du centre de stockage

Les installations de Cigéo constituent une seule et même installation nucléaire de base (INB) qui comprend :

- des installations de surface réparties en deux ensembles distincts :
  - ✓ la zone dédiée à la réception des colis primaires HA et MA-VL, à leurs contrôles et à leur préparation pour le stockage (dite zone « descenderie ») ;
  - ✓ la zone dédiée aux activités de support aux travaux souterrains (dite zone « puits ») ;

- une installation souterraine composée de liaisons surface-fond (descenderies, puits), des quartiers de stockage des colis et des zones de soutien logistique (ZSL).

Par ailleurs, un ensemble d'installations conventionnelles de surface (poste de garde, bâtiment d'accueil du public, parkings…) et d'aménagements (postes électriques, liaison ferroviaire, adduction d'eau…) est réalisé.

L'ensemble des opérations de préparation des colis primaires au stockage, de manutention, de transfert dans l'installation souterraine et de mise en place des colis de stockage dans les alvéoles, voire les éventuelles opérations de retrait, sont automatisées et supervisées depuis la salle de commande centralisée située en zone descenderie.

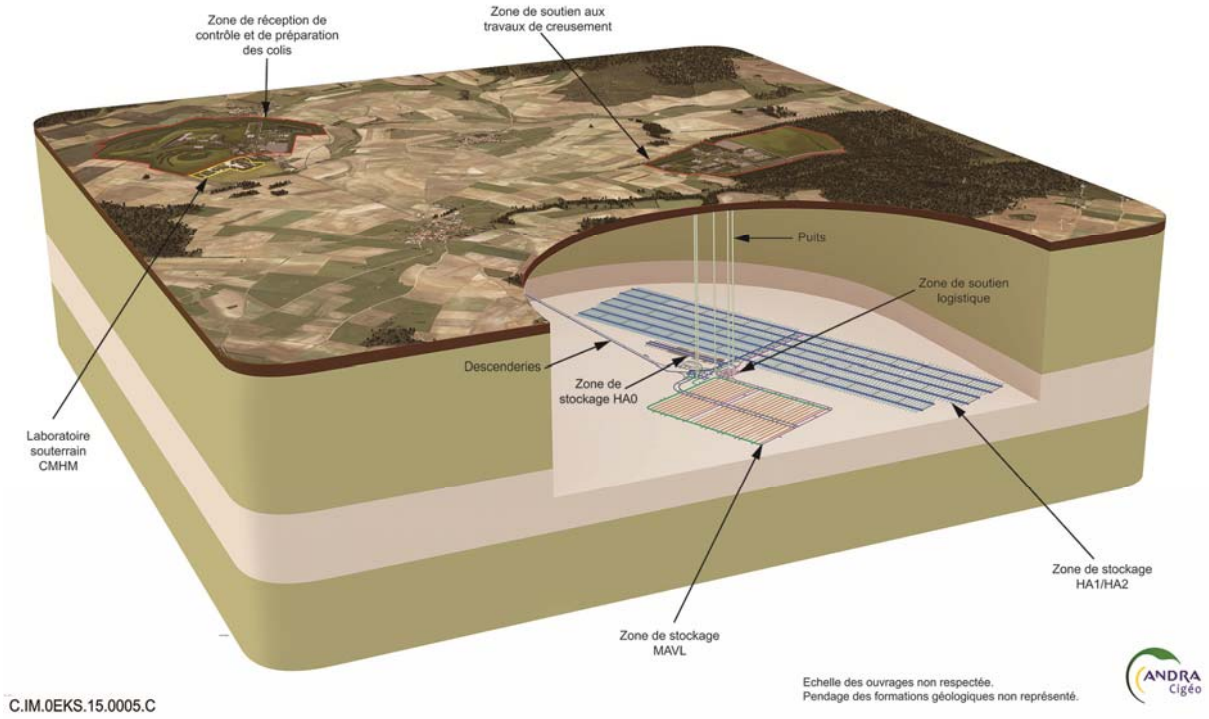


Figure 2-5 *Localisation respective des installations de surface et de l'installation souterraine de Cigéo (sur la base des études d'APS) – (échelle non respectée pour raisons de lisibilité)*

2.3.1 Installations de surface de la zone descenderie

Les installations nucléaires de la zone descenderie regroupent l'ensemble des bâtiments de surface consacrés à l'accueil et au déchargement des convois, à l'ouverture des emballages de transport et au déchargement des colis de déchets radioactifs hors de ces emballages de transport, au conditionnement des colis primaires dans les conteneurs de stockage, aux contrôles nucléaires associés et à la mise en hotte pour transfert dans l'installation souterraine ; elles comportent également les moyens de soutien à l'exploitation de l'installation (ateliers de maintenance, magasins, parcs de matériel, vestiaires…).

Les bâtiments et équipements utilisés pour l'accueil et le déchargement des emballages de transport peuvent également être utilisés pour une éventuelle expédition des colis de déchets hors de Cigéo.

Préalablement à leur mise en stockage, les colis primaires sont introduits dans un conteneur de stockage qui est ensuite fermé par mise en place d'un couvercle fixé sur le corps du conteneur.

Pour les colis MA-VL, il s'agit d'un conteneur et d'un couvercle en béton (cf. § 3.3.2 ci-après). Pour les colis HA d'un conteneur et d'un couvercle en acier soudé (cf. § 3.3.3 ci-après). L'ensemble constitué par le colis primaire et son conteneur de stockage constitue un « colis de stockage ».[3]

Une fois constitué, le colis de stockage est placé dans une « hotte » et dirigé vers une descenderie pour être descendu dans l'installation souterraine en vue de son stockage (cf. § 2.3.3.1 à 2.3.4 ci-après). Cette hotte peut également être utilisée pour une éventuelle opération visant à remonter un colis de déchets.

Les bâtiments qui abritent ces opérations sont des ouvrages en béton armé de type monobloc semi-enterré.

Figure 2-6 Perspective aérienne des installations nucléaires de surface (sur la base des études d'APS)

Le développement progressif de Cigéo conduit à un déploiement en deux phases des ouvrages nucléaires de la zone descenderie (cf. § 2.2 du présent document) :

- une première installation nucléaire dite « EP1 », dédiée aux colis MA-VL et aux premiers colis HA0 réceptionnés est exploitée sur le centre de 2030 jusque vers 2100 ;
- une seconde installation nucléaire dite « EP2 », dédiée aux colis HA1/HA2 et construite dans un second temps, exploitée de 2079 jusque vers 2150.

[3] Comme déjà indiqué ci-avant (cf. § 2.1 du présent document), une piste d'optimisation étudie la possibilité de stocker directement, sans conteneur de stockage, certains colis primaires MA-VL.

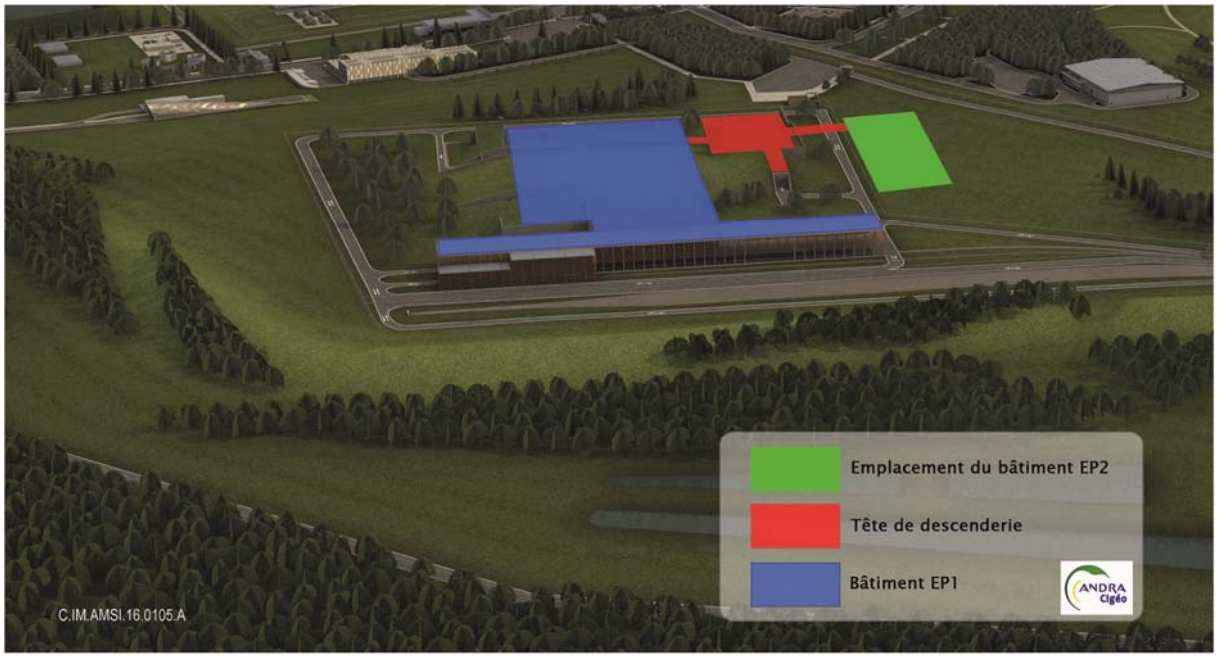


Figure 2-7 Dispositions respectives des installations d'EP1, EP2 et tête de descenderie (sur la base des études d'APS)

En plus des installations nucléaires, la zone descenderie accueille également des bâtiments à caractère conventionnel en support aux activités nucléaires (poste de garde, parkings, bâtiment d'accueil du public, bâtiments administratifs…).

2.3.2 Installations de surface de la zone puits

Les installations de surface de la zone puits comprennent essentiellement les moyens et bâtiments liés, d'une part à l'exploitation nucléaire souterraine (ZEXP), d'autre part aux travaux de construction et d'extension des ouvrages souterrains (zone travaux et verses).

Figure 2-8 Schéma des périmètres géographiques de la zone puits (sur la base des études d'APS)

Les moyens et équipements liés au soutien et à la maintenance de la partie de l'installation souterraine en exploitation nucléaire sont implantés au Sud (ZEXP). Outre des ouvrages abritant la machinerie nécessaire aux moyens de manutention et de transfert par un puits dédié, la ZEXP contient les ouvrages dédiés à l'accueil et au transfert du personnel d'exploitation vers le fond, ainsi que des unités de ventilation dédiées respectivement à l'apport d'air frais et à l'extraction d'air vicié (cf. § 2.3.3.2).

Les bâtiments liés aux travaux d'extension de l'installation souterraine sont implantés au centre et au Nord (zone travaux et verses). Il s'agit des bâtiments associés aux puits reliant la surface à la partie « travaux » de l'installation souterraine pour le transfert du personnel « travaux », l'apport d'air frais, l'extraction d'air vicié, l'apport et l'évacuation de matériel et de matériaux de construction. Le stockage des verses est situé au Nord de la zone.

En plus de ces bâtiments, la zone puits comporte également des installations support comme le poste électrique, les centrales à béton, l'entreposage des matériels et des matériaux de travaux (notamment les voussoirs) et les ateliers de maintenance et magasins associés (zone site).

2.3.3 Liaisons surface-fond

2.3.3.1 Descenderies

Les descenderies sont deux tunnels inclinés et parallèles d'un entraxe de 60 m et ayant une pente de 12 %. Leur longueur est d'environ 4 200 m.

L'une des deux descenderies est destinée au transfert des colis dans l'installation souterraine au moyen d'un funiculaire. Elle est reliée en tête aux bâtiments EP1, puis EP2, des installations nucléaires de surface de la zone descenderie (cf. § 2.3.1) et en pied à la zone de soutien logistique Exploitation (cf. § 2.3.4.2). Le funiculaire descend et remonte les « hottes » dans lesquelles sont placés les colis de stockage. Le funiculaire permet de descendre et, le cas échéant, de remonter des colis de stockage.

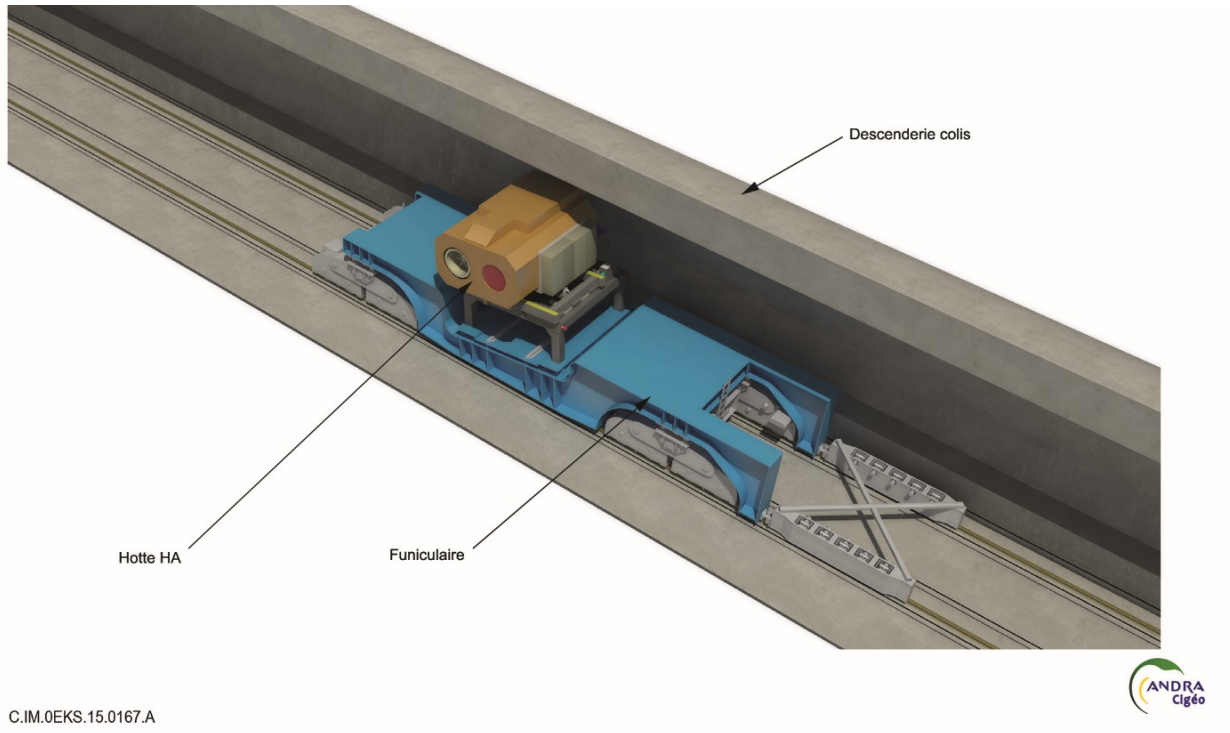


Figure 2-9 Transfert d'une hotte HA par funiculaire dans la descenderie colis (sur la base des études d'APS)

La descenderie de service est utilisée pour les opérations d'évacuation et de secours et pour les opérations de maintenance. Elle possède sa propre émergence en surface et elle est reliée, en pied, à la zone de soutien logistique Exploitation (cf. § 2.3.4.2).

Lors des opérations de fermeture définitive de Cigéo, des scellements sont placés dans les descenderies. Les descenderies sont remblayées jusqu'en surface (6).

2.3.3.2 Puits

Cinq puits permettent de relier les installations de surface à l'installation souterraine. Ces puits ont une profondeur comprise entre 500 et 550 m.

Les fonctions à remplir par les puits sont les suivantes :

- deux puits pour l'exploitation en souterrain :
  - ✓ le puits dit « Exploitation Personnel Ventilation Air Frais » pour le transfert du personnel des installations de surface vers la Zone de Soutien Logistique Exploitation (cf. § 2.3.4.1) et pour l'apport d'air frais aux installations souterraines à partir des unités de ventilation situées en surface ;
  - ✓ le puits dit « Exploitation Air Vicié » pour l'extraction d'air des ouvrages souterrains ;
- trois puits pour les travaux en souterrain :
  - ✓ le puits dit « Travaux Personnel Air Frais » pour le transfert du personnel des installations de surface conventionnelles vers la Zone de Soutien Logistique Travaux (cf. § 2.3.4.1), ainsi que pour l'apport d'air frais dans la zone travaux ;

- ✓ le puits dit « Travaux Ventilation air vicié » pour l'extraction d'air vicié des galeries en activité travaux ;
- ✓ le puits dit « Travaux Matériels Matériaux » pour le transfert des équipements, matériels et matériaux nécessaires aux travaux et l'acheminement vers la surface des déblais issus des excavations. Il permet également le transfert d'équipements volumineux.

Lors des opérations de fermeture définitive de Cigéo, des scellements sont placés dans les puits. Les puits sont remblayés jusqu'en surface.

2.3.4 Installation souterraine

L'architecture de l'installation souterraine est organisée de manière à assurer la séparation physique des activités d'exploitation nucléaire et des autres activités, notamment des travaux d'extension des zones de stockage, pour limiter les risques de coactivité (6). Elle répond également aux exigences de sûreté après fermeture, par exemple le stockage des déchets MA-VL, HA0 et HA1/HA2 dans des quartiers séparés (7).

L'installation souterraine est composée des trois grands blocs fonctionnels suivants (cf. Figure 2-10) :

- la zone de soutien logistique Travaux (ZSL-T) située à l'aplomb des puits travaux ;
- la zone de soutien logistique Exploitation (ZSL-E) située au bas des puits d'exploitation et des descenderies ;
- la zone de stockage dans laquelle sont situés les quartiers de stockage des déchets MA-VL et les quartiers de stockage des déchets HA0 et HA1/HA2.

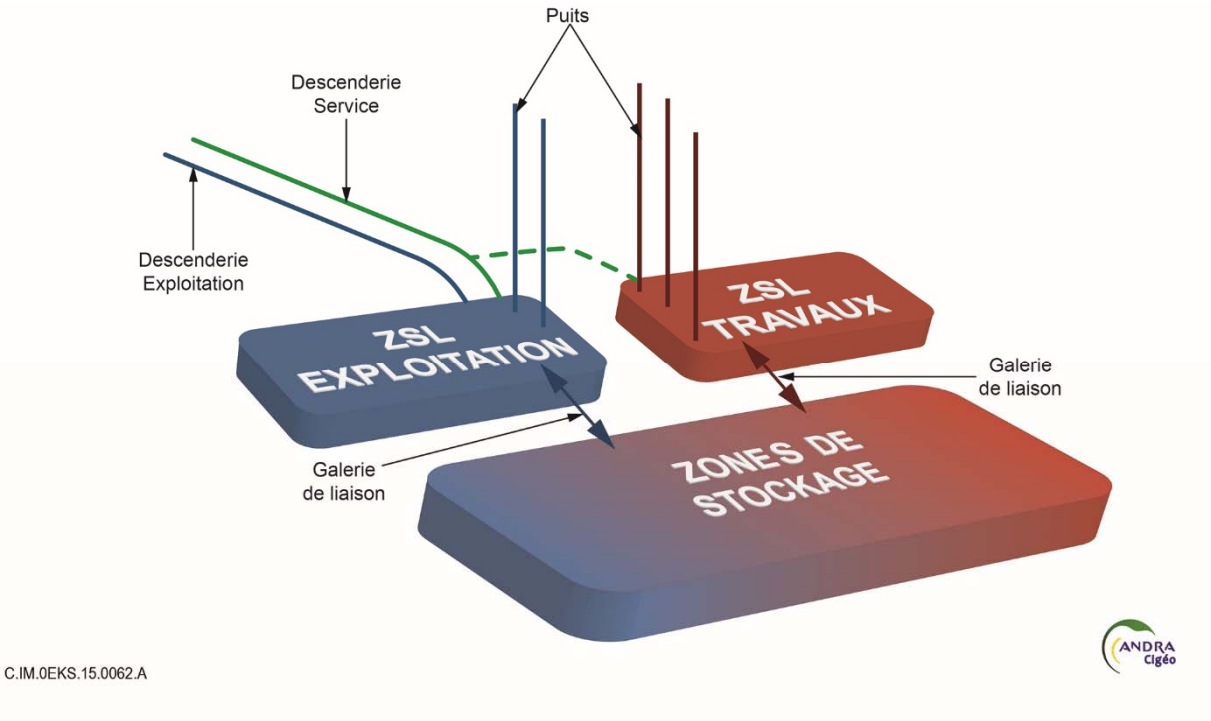


Figure 2-10 Organisation de l'installation souterraine (sur la base des études d'APS)

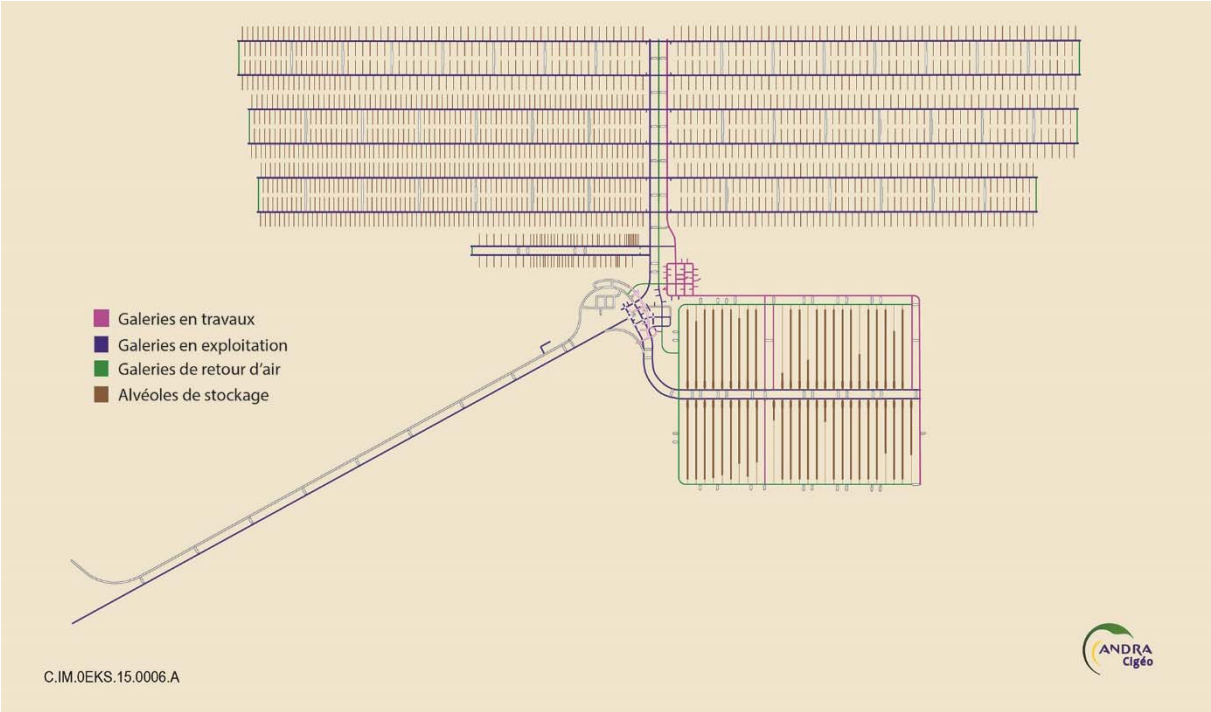


Figure 2-11 Vue de l'installation souterraine (sur la base des études d'APS)

2.3.4.1 Zone de soutien logistique « Travaux » (ZSL-T)

La ZSL-T constitue l'interface entre les installations de surface et les ouvrages souterrains en cours de construction. Cette zone permet le passage des flux entrants (matériaux de construction, équipements…) et sortants (déblais…) pour la construction des ouvrages. Elle comporte divers locaux techniques (zone de vie et de secours, stockage des matériaux et matériels…).

La zone de soutien logistique « Travaux », et de façon générale l'ensemble de l'installation souterraine en travaux, ne joue aucun rôle dans la récupérabilité.

2.3.4.2 Zone de soutien logistique Exploitation (ZSL-E) et galeries de liaison

La ZSL-E a pour fonction principale d'assurer le soutien aux opérations de mise en stockage des colis.

Les hottes chargées des colis de stockage arrivent dans la ZSL-E au niveau de la gare « basse » du funiculaire de la descenderie « Colis ». Ces hottes sont reprises par un chariot sur rails qui se déplace ensuite dans les galeries de liaison vers les quartiers de stockage. Aux intersections de galeries, la rotation du chariot s'effectue au moyen de tables tournantes.

Le chariot peut transporter les hottes contenant les colis de stockage indifféremment de la descenderie vers les quartiers de stockage ou de ces quartiers vers la descenderie en cas d'opération éventuelle de remontée de colis de stockage à la surface.

La ZSL-E accueille les locaux techniques nécessaires à la maintenance courante des chariots et des hottes de transfert, ainsi que les équipements nécessaires pour une intervention en cas d'incident. Afin de limiter la présence de personnel dans les installations nucléaires souterraines, les opérations de maintenance plus importantes sur les hottes et les chariots sont réalisées en surface.

2.3.4.3 Quartier MA-VL

Le quartier de stockage MA-VL est principalement composé de galeries, d'alvéoles de stockage, de galeries de retour d'air et de galeries de travaux. A terminaison, il comporte environ 50 alvéoles (besoin estimé au stade de l'APS), adaptés aux contraintes physico-chimiques et géométriques des colis de stockage.

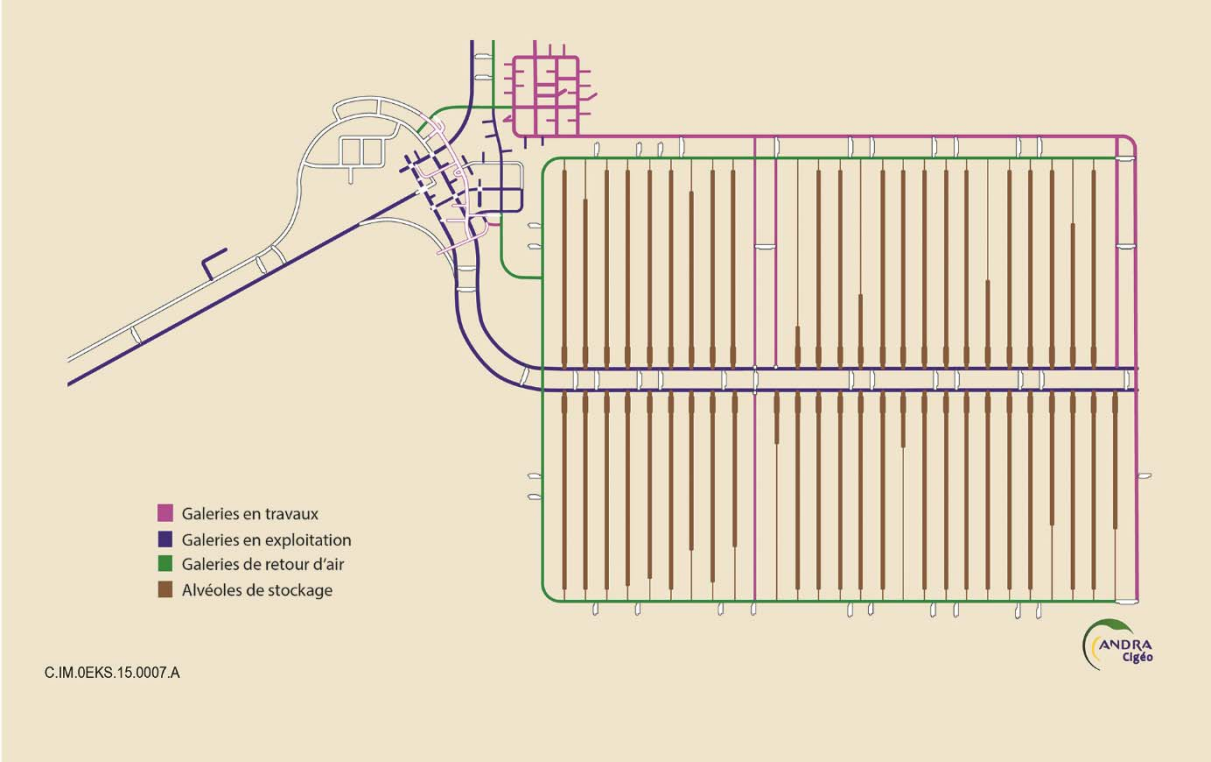


Figure 2-12 Architecture du quartier MA-VL à terminaison (sur la base des études d'APS)

<u>Galeries</u>

Deux galeries desservent le quartier MA-VL. Des recoupes relient ces deux galeries, *a minima* tous les 400 m. Elles sont équipées de rails sur le radier permettant la circulation du chariot de transfert. La hotte pleine est déposée à l'intersection avec la galerie d'accès à l'alvéole.

<u>Alvéoles de stockage MA-VL</u>

Les alvéoles de stockage MA-VL sont des tunnels souterrains, creusés dans la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien (COx), pour y accueillir les colis de stockage MA-VL. Ces alvéoles sont orientés dans le sens de la contrainte principale majeure dans le Callovo-Oxfordien (N155° E). La stabilité de l'alvéole, de section excavée de 17 à 65 m^2 environ[4] en partie utile (en fonction du nombre de colis par section), est assurée par un revêtement en béton de forme cylindrique.

Les alvéoles MA-VL sont constitués de plusieurs parties :

- un tronçon (galerie d'accès) destiné à recevoir un ouvrage de fermeture à l'entrée de l'alvéole ;
- un tronçon pour les opérations d'accostage ;
- une cellule de manutention ;
- la partie utile de l'alvéole pour le stockage des colis de stockage ;
- une jonction de retour d'air.

[4] Pour une section circulaire, cette section correspond à un diamètre excavé de l'ordre de 9 m. L'Andra étudie la possibilité d'élargir la section de certains alvéoles.

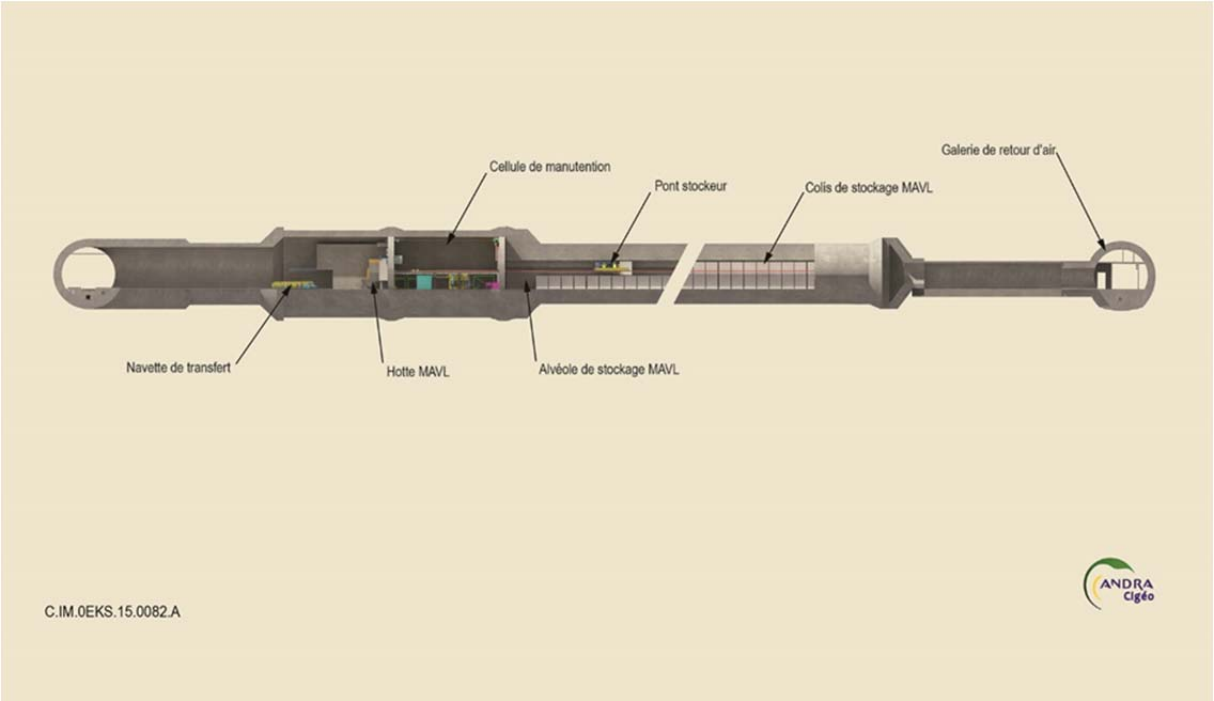


Figure 2-13 Alvéole MA-VL - Coupe longitudinale (sur la base des études d'APS)

A l'intersection entre la galerie et le tronçon destiné à recevoir l'ouvrage de fermeture de l'alvéole MA-VL, une navette prend la hotte sur le chariot et la transfère jusqu'à la façade d'accostage. Une fois accostée, la hotte est ouverte pour permettre l'introduction du colis de stockage dans la cellule de manutention. La porte de la façade d'accostage est refermée et la hotte est retournée vers la surface pour prise en charge d'un nouveau colis.

La navette peut transporter les hottes contenant les colis de stockage indifféremment de la galerie vers l'alvéole ou de l'alvéole vers la galerie en cas d'opération éventuelle de retrait de colis de stockage de l'alvéole.

Pour son introduction dans la partie utile de l'alvéole, le colis de stockage est pris en charge par le pont stockeur. La porte qui sépare la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole est alors ouverte et le pont achemine le colis de stockage jusqu'à sa position de stockage. Pour limiter les risques liés à la chute d'un colis, le remplissage de la partie utile de l'alvéole s'effectue par couches successives de colis de stockage[5]. La longueur maximale de cette partie utile est d'environ 500 m. Une fois le colis de stockage déposé, le pont revient dans la cellule de manutention et la porte est refermée.

[5] Remplissage dit « par nappes », par rangées perpendiculaires à l'axe de l'alvéole progressant du fond de l'alvéole vers sa tête.

La partie utile de l'alvéole est une chambre de stockage en béton de section rectangulaire. Sa géométrie est adaptée à la forme parallélépipédique des colis de stockage. Elle permet la circulation du pont stockeur pour la mise en place des colis et pour leur retrait éventuel.

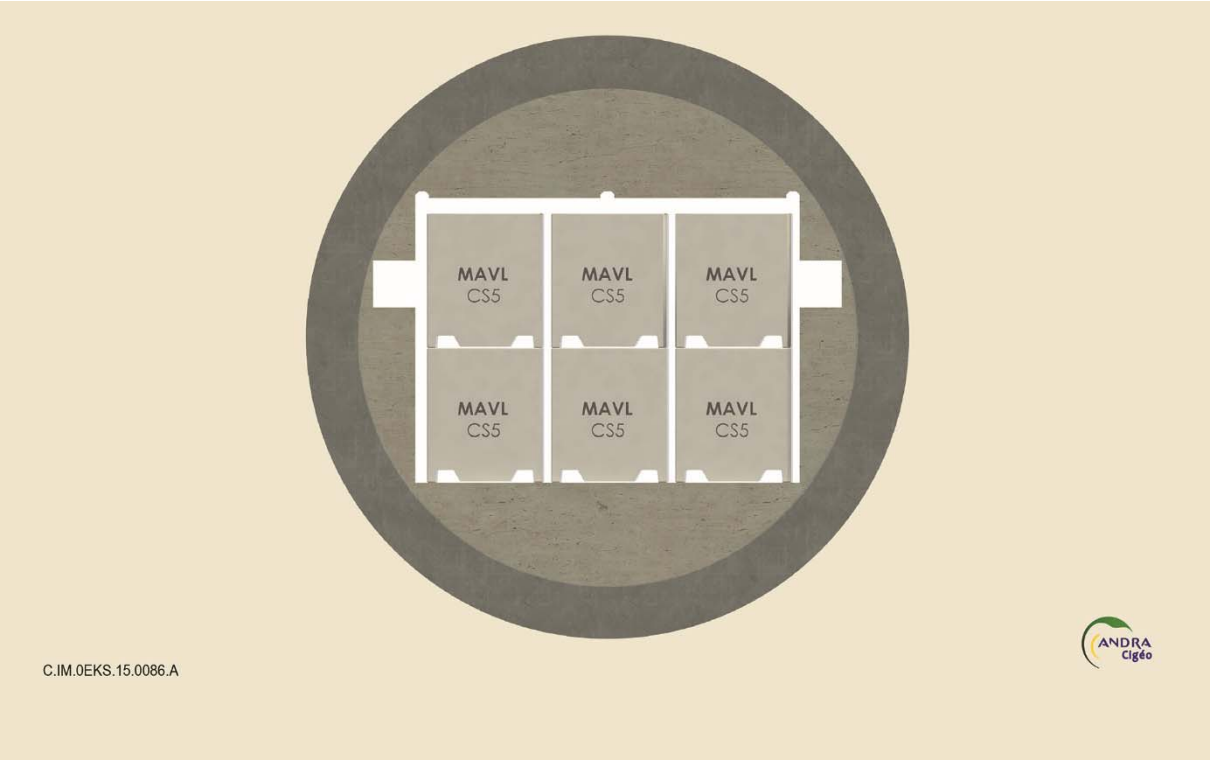


Figure 2-14 Alvéole MA-VL - Coupe transversale en partie utile (sur la base des études d'APS)

Un système de ventilation assure un balayage de l'alvéole. L'entrée d'air s'effectue du côté de la galerie d'accès et son extraction s'effectue en fond d'alvéole par un conduit de ventilation qui assure la jonction avec la galerie de retour d'air. La longueur de la jonction de retour d'air varie en fonction de la longueur utile de l'alvéole.

A la fin du remplissage de chaque couche (nappe) de colis de stockage dans l'alvéole, des blocs en béton préfabriqués sont introduits, pour des raisons de radioprotection (cf. § 3.3.5.1 du présent document), au moyen du pont stockeur à l'intérieur de l'alvéole, dans l'espace situé entre les derniers colis de stockage et l'emplacement de la porte de la cellule de manutention.

A la fin du chargement de l'alvéole MA-VL et une fois le mur de radioprotection constitué, les équipements de la cellule de manutention et de la tête d'alvéole pouvant éventuellement être réutilisés pour d'autres alvéoles sont démontés. Les équipements non démontés sont mis sous cocon (mise en position sûre, protection, vidange des capacités de fluide, mise hors tension…). L'objectif de cette opération est de les préserver pour une éventuelle utilisation ultérieure (opération de retrait) tout en limitant au maximum les risques et les opérations de maintenance en attente de cette éventuelle réutilisation. Les démontages et mises sous cocon interviennent dans un délai d'environ 1 an après la fin du remplissage de l'alvéole. La ventilation de l'alvéole, ainsi que l'ensemble des dispositifs de surveillance et tous les équipements participant à la sûreté sont maintenus opérationnels en attente des opérations de fermeture de l'alvéole.

Galeries de retour d'air

Les galeries de retour d'air sont directement connectées au fond des alvéoles MA-VL et permettent d'acheminer l'air extrait des alvéoles MA-VL vers le puits « Exploitation Air Vicié »[6].

Fermeture des alvéoles et du quartier

Conformément au schéma de fermeture présenté dans la proposition de PDE (5), la fermeture des alvéoles MA-VL et la fermeture du quartier MA-VL sont entreprises vers 2100, à l'issue du remplissage du dernier alvéole du quartier.

La première étape consiste à enlever les équipements restant dans la cellule de manutention, le tronçon d'accostage et le tronçon destiné à recevoir l'ouvrage de fermeture.

L'alvéole est ensuite obturée par des murs en béton qui l'isolent côté cellule de manutention et côté de la galerie de retour d'air. La ventilation est de fait arrêtée à l'intérieur de l'alvéole.

La fermeture de l'alvéole est finalisée par la préparation et la mise en place, de part et d'autre de l'alvéole, d'ouvrages complémentaires d'obturation (typiquement des composants de types scellement ou remblai).

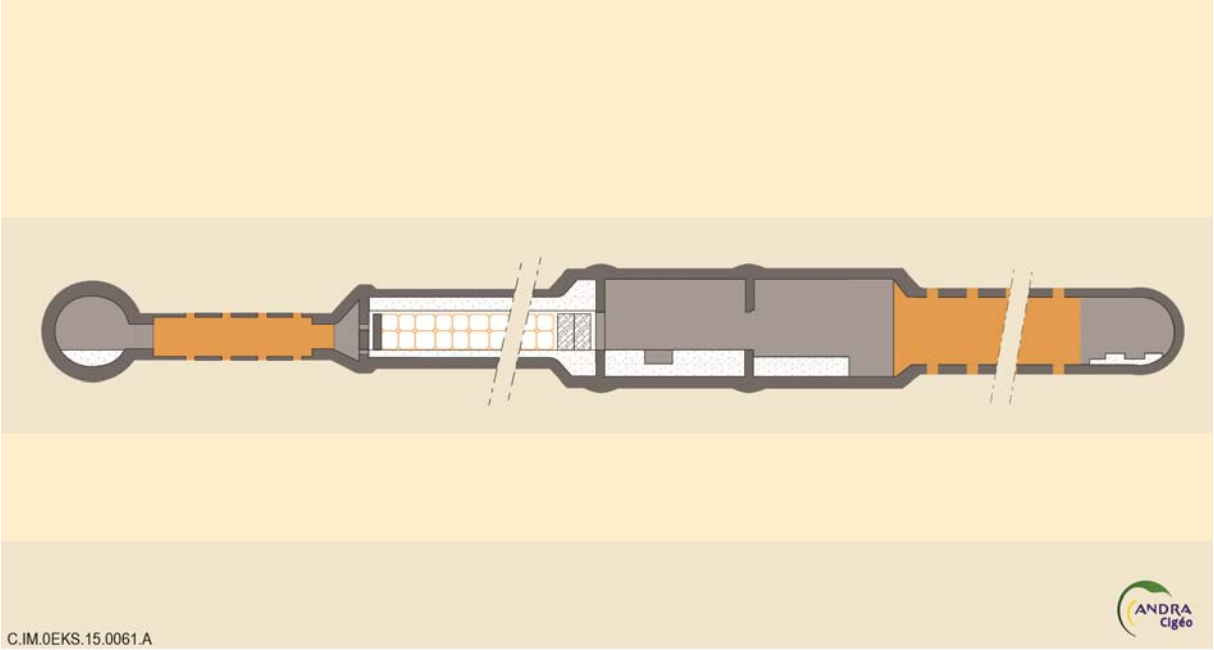


Figure 2-15 Schéma d'un alvéole MA-VL obturé – exemple d'illustration présentant des scellements (sur la base des études d'APS)

Dans la foulée de la fermeture des alvéoles, la fermeture du quartier est réalisée par le déséquipement des galeries de liaison, de retour d'air et de leur recoupe, puis par leur remblayage (réutilisation des argilites des verses) et enfin leur scellement (mise en œuvre de massifs d'appuis associés à un noyau en argile).

L'architecture du stockage permet la fermeture des alvéoles MA-VL et du quartier MA-VL sans perturber les opérations de stockage menées dans la zone HA1/HA2.

Les opérations de fermeture des alvéoles MA-VL sont présentées de façon plus détaillée dans la partie du DOS relative à l'exploitation (6).

[6] Un système de filtration est prévu.

2.3.4.4 Quartier HA0

Le quartier de stockage des colis HA0 est constitué d'alvéoles de stockage et de deux galeries. Dans la solution retenue à ce stade, il est réalisé en une seule phase, dès la construction initiale de Cigéo. Sur la base des études d'APD, la part des alvéoles HA0 construits en T1 pourra éventuellement être réduite.

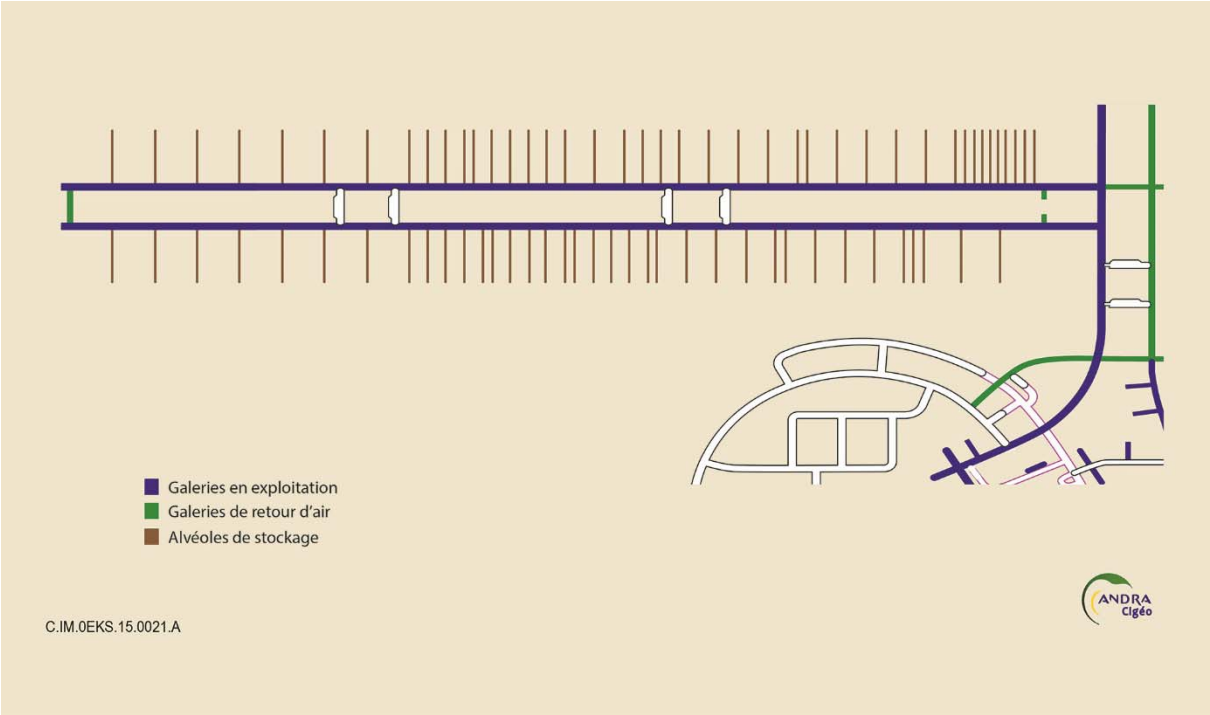


Figure 2-16 Vue en plan du quartier HA0 (sur la base des études d'APS)

Galeries

Les deux galeries permettent d'accéder aux alvéoles de stockage à partir de la galerie de liaison reliée à la zone de soutien logistique Exploitation (ZSL-E). Elles sont reliées par des recoupes permettant leur évacuation. Une navette circulant dans la galerie prend en charge la hotte déposée par le chariot à l'intersection avec la galerie de liaison, l'amène jusque devant l'alvéole prévu pour son stockage et la dépose pour son accostage.

La navette du quartier HA0 fonctionne dans les deux sens. Elle permet aussi bien d'amener une hotte chargée d'un colis de stockage vers un alvéole pour son stockage, que de ramener une hotte chargée d'un colis de stockage vers la galerie de liaison dans le cas d'un éventuel retrait.

Alvéoles HA0

Les alvéoles de stockage pour les colis de stockage HA0 sont des micro-tunnels borgnes creusés dans la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien. A ce stade des études, leur longueur totale est d'environ 80 m. Ils présentent une faible pente (point bas vers la galerie) afin de recueillir l'eau qui proviendrait éventuellement de la roche. Ils sont revêtus d'un chemisage métallique. Lors de la construction de l'alvéole, un coulis à base de matériau cimentaire est injecté entre ce chemisage et la roche.

Les colis sont mis en place dans l'alvéole au moyen d'un robot pousseur. Un robot tracteur est utilisé pour leur éventuel retrait.

Un alvéole HA0 est constitué de deux parties principales :

- la tête d'alvéole constituée d'un massif d'accostage en paroi de la galerie, d'un tube en acier de diamètre supérieur au diamètre du chemisage, ancré au soutènement de la galerie et au massif d'accostage et d'un tronçon destiné à recevoir un matériau d'obturation. Lors de la phase de

remplissage des colis, la tête d'alvéole accueille un bouchon de radioprotection d'exploitation qui est retiré et remis en place entre chaque opération d'introduction d'un colis ;

- la partie utile de l'alvéole est principalement constituée du chemisage dans lequel glisse le colis lors de sa manutention.

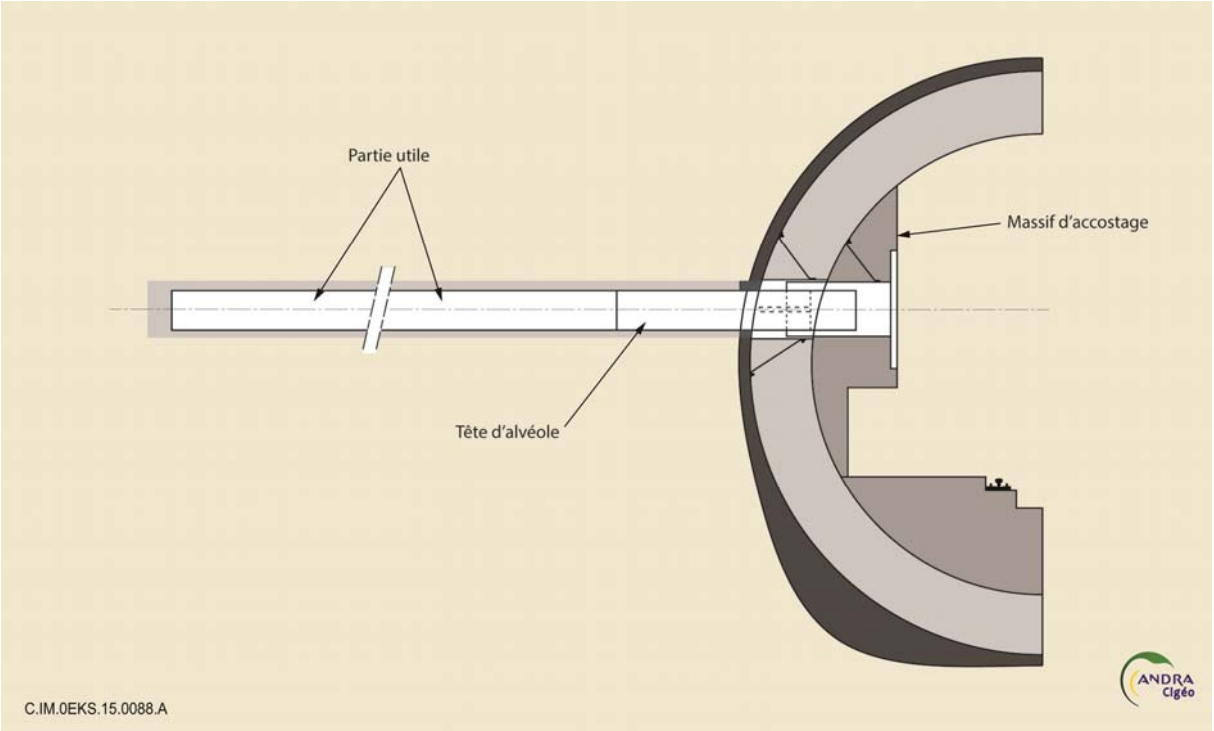


Figure 2-17 *Schéma d'un alvéole HA0 avant remplissage (sur la base des études d'APS) le bouchon de radioprotection et les équipements de manutention ne sont pas représentés*

La récupération de l'eau provenant éventuellement du terrain est réalisée au moyen d'un système de drainage gravitaire. La solution technique pour ce dispositif n'a pas encore été arrêtée par l'Andra. Elle fera l'objet de développements complémentaires pendant l'APD et sera présentée dans la DAC. La solution envisagée à ce stade consiste en un piquage sur la génératrice inférieure du chemisage en tête d'alvéole et d'un « tube de drainage » connecté à un réseau de conduites permettant de contrôler et d'évacuer ces eaux. Le système de drainage est conçu pour rester opérationnel, y compris en présence d'éventuels produits de corrosion véhiculés par l'eau.

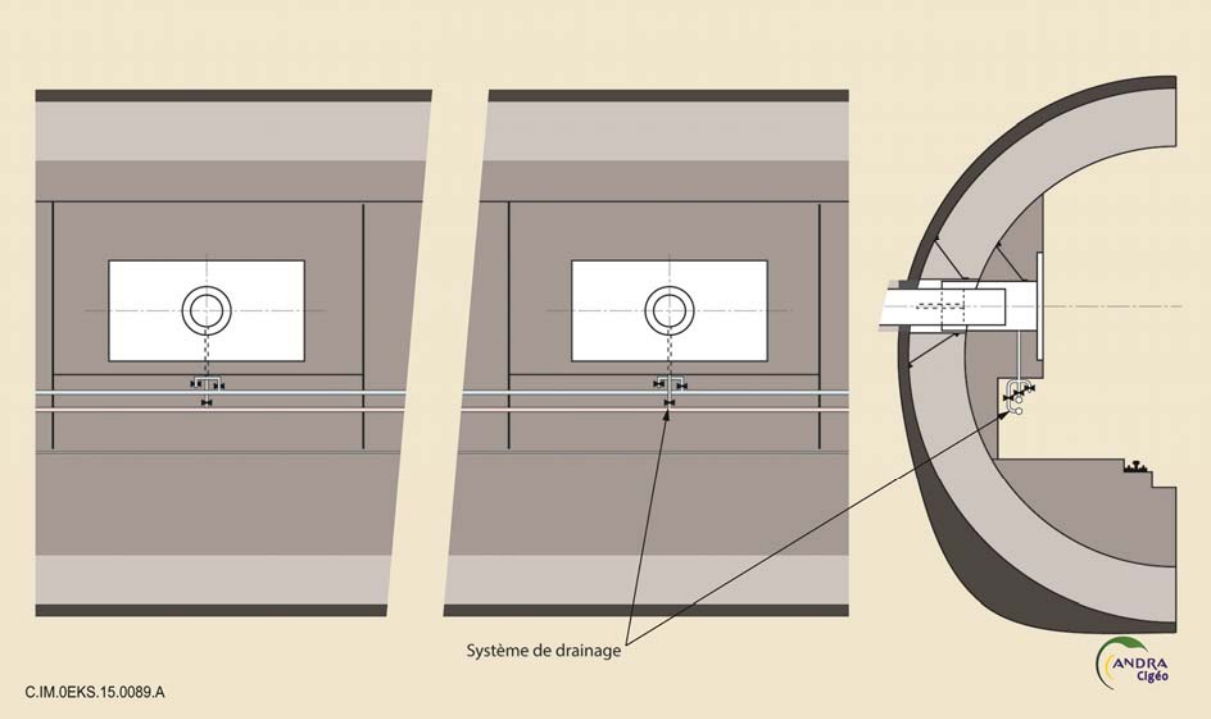


Figure 2-18 Schéma de principe de drainage d'un alvéole HA0 (sur la base des études d'APS)

A la fin des opérations de remplissage d'un alvéole, le bouchon de radioprotection d'exploitation est récupéré et un bouchon de radioprotection de fermeture est introduit au fond de la tête d'alvéole à proximité des colis.

Une plaque instrumentée en acier (bride amovible) est fixée sur la tête d'alvéole dans la galerie. Elle limite les échanges d'air entre l'alvéole et la galerie pour préserver les colis et le chemisage de la corrosion. Elle permettra de réaliser des prélèvements dans l'alvéole, en particulier de gaz.

A la fin du remplissage du quartier HA0, les équipements de manutention dans les galeries sont démontés ou mis sous cocon. L'objectif de cette opération est de les préserver pour une éventuelle utilisation ultérieure (opération de retrait) tout en limitant au maximum les risques et les opérations de maintenance en attente de cette éventuelle réutilisation. Les démontages et mises sous cocon interviennent dans un délai d'environ 1 an après la fin du remplissage du quartier. L'ensemble des dispositifs de surveillance et tous les équipements participant à la sûreté sont maintenus opérationnels en attente des opérations de fermeture du quartier.

<u>Fermeture des alvéoles et du quartier HA0</u>

Conformément à la proposition de PDE (5), les alvéoles HA0 seront fermés à l'horizon 2070. La fermeture du quartier HA0 est réalisée dans la foulée.

La fermeture de l'alvéole est réalisée par la mise en place d'un matériau d'obturation en tête d'alvéole et par l'arrêt du système de drainage.

La fermeture du quartier est finalisée par le déséquipement complet des galeries et de leurs recoupes, puis par leur remblayage (réutilisation de l'argile des verses).

L'architecture du stockage est telle que les opérations de fermeture des alvéoles HA0 et du quartier HA0 peuvent être réalisées sans perturber les opérations de stockage menées dans la zone MA-VL.[7]

[7] Dans le déroulement de référence présenté dans la proposition de plan directeur pour l'exploitation, la réception des colis HA1/HA2 n'a pas encore débuté en 2070.

Les opérations de fermeture sont présentées de façon plus détaillée dans la partie du DOS relative à l'exploitation (6).

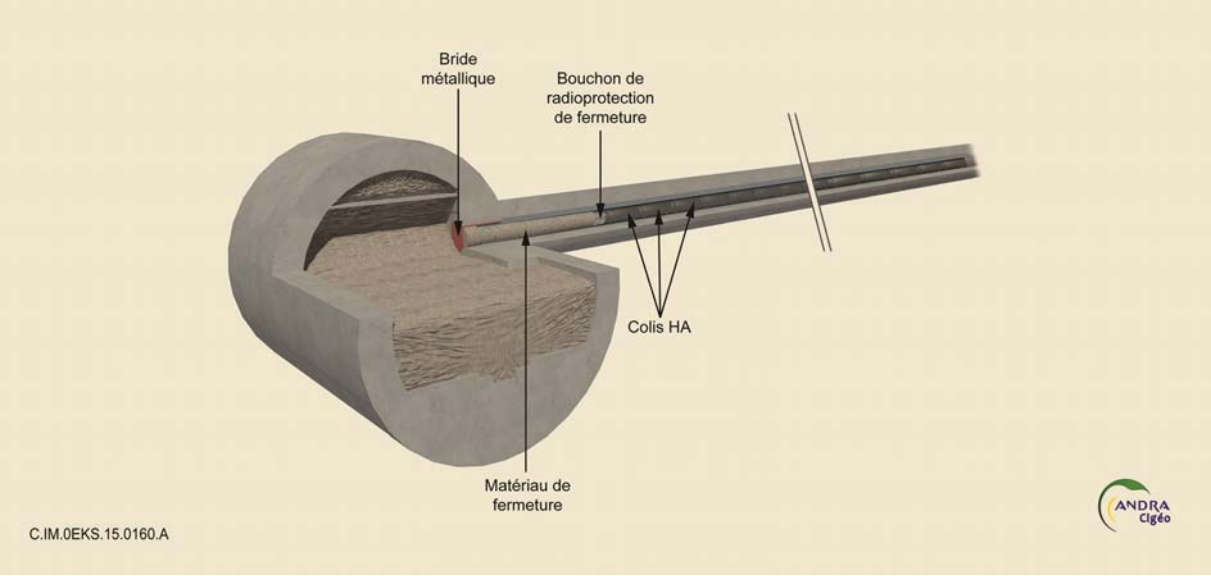


Figure 2-19 Vue de l'alvéole HA0 obturé avec galerie remblayée (sur la base des études d'APS)

2.3.4.5 Quartiers de stockage de déchets HA fortement exothermiques (dits HA1/HA2)

Les colis de déchets HA1 et HA2 sont stockés dans des alvéoles regroupés en plusieurs quartiers ; l'inventaire actuel de déchets HA1/HA2 conduit à prévoir six de ces quartiers.

Chaque quartier est constitué d'alvéoles et de deux galeries. Ces dernières sont reliées par des recoupes pour faciliter leur évacuation. Les alvéoles sont placés de part et d'autre de chaque galerie.

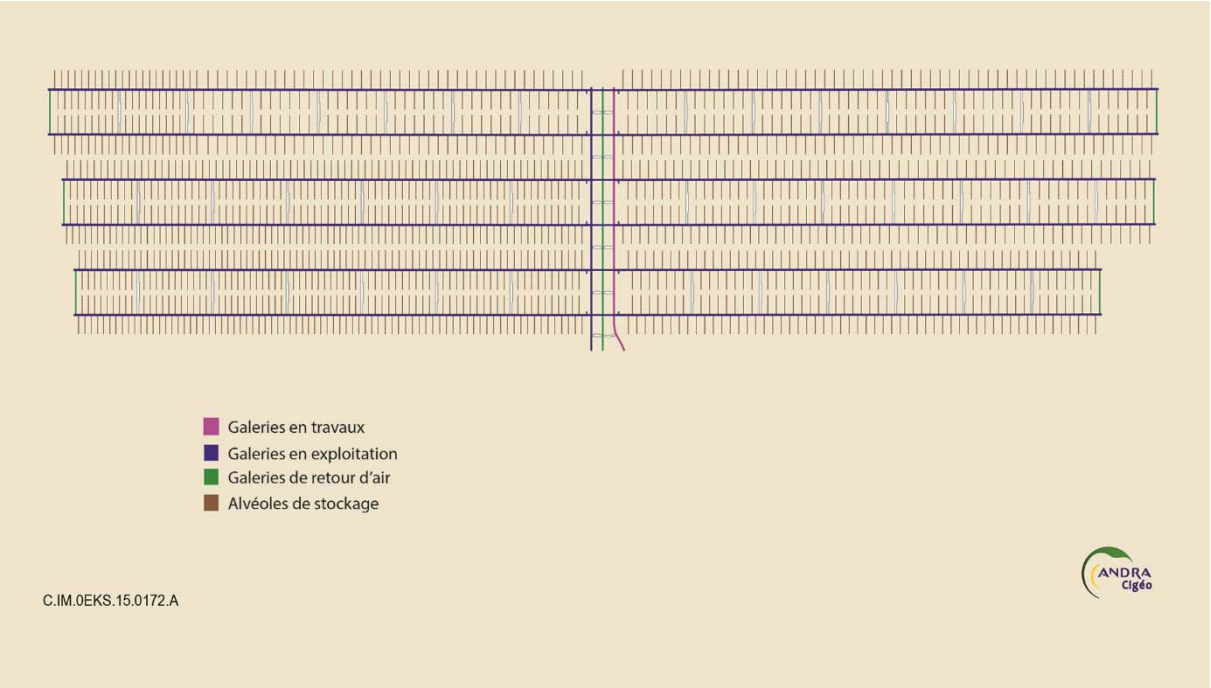


Figure 2-20 Vue en plan des quartiers HA1/HA2 (sur la base des études d'APS)

La conception des alvéoles est identique à celle des alvéoles du quartier HA0, à l'exception de la longueur prise à ce stade égale à 100 m.

Le principe de transfert des colis de stockage HA1/HA2 par une navette est identique à celui retenu pour les colis HA0 (cf. § 2.3.4.4 du présent document).

Dans la partie utile des alvéoles, compte tenu de leur puissance thermique élevée, les colis HA1/HA2 peuvent, le cas échéant, être séparés par des intercalaires. Si c'est le cas, ceux-ci sont mis en place par le même robot pousseur que les colis de stockage.

Les alvéoles des deux galeries de chaque quartier sont remplis simultanément, depuis le fond du quartier, vers les galeries de liaison.

Fermeture des alvéoles et des quartiers HA1/HA2

Conformément à la proposition de PDE (5), les alvéoles HA1/HA2 seront fermés à l'horizon 2145, à l'issue du remplissage du dernier quartier HA1/HA2. La fermeture des quartiers HA1/HA2 est réalisée dans la foulée.

La fermeture des alvéoles et des quartiers HA1/HA2 est réalisée de façon similaire à celle des alvéoles et du quartier HA0. Des scellements des galeries de liaison des zones HA sont installés (massifs d'appui et noyaux d'argile associés).

Les opérations de fermeture sont présentées dans la partie du DOS relative à l'exploitation (6).

3

Démarche de récupérabilité sur Cigéo

3.1 Objectifs de récupérabilité de Cigéo 40
3.2 Fondements de la récupérabilité de Cigéo 40
3.3 Robustesse des conteneurs, des alvéoles et des équipements laissés en place dans les alvéoles après leur remplissage 40
3.4 Surveillance 59
3.5 Équipements de retrait 61
3.6 Aptitude à la déconstruction et à la remise en service des ouvrages de fermeture d'alvéole et de galerie de Cigéo 72
3.7 Dispositions conservatoires 81
3.8 Dispositions d'exploitation 83
3.9 Réévaluations périodiques de la récupérabilité 86

3.1 Objectifs de récupérabilité de Cigéo

Cigéo est conçu pour permettre la récupération des colis de déchets qui y seront stockés pendant toute son exploitation, jusqu'à sa fermeture définitive, quel que soit le niveau de fermeture partielle de l'installation.

Les objectifs en termes de récupérabilité sont de pouvoir retirer les déchets des alvéoles de stockage et de les transférer, soit vers les installations de surface, soit vers un autre alvéole de stockage :

- de façon similaire à la mise en stockage (procédé inverse) ;
- sur la base des mêmes objectifs et contraintes de sécurité et de sûreté.

Deux possibilités de gestion sont envisagées pour les colis remontés en surface :

- la remise en stockage ;
- l'expédition vers un autre site (cf. § 1.2.2 du présent document).

3.2 Fondements de la récupérabilité de Cigéo

Afin de forger la conviction que la capacité à retirer les colis de Cigéo sera préservée sur toute la durée de son exploitation, l'Andra a défini une approche basée sur les principes suivants :

- la robustesse et la durabilité des principaux composants jouant un rôle pour le retrait (conteneurs, alvéoles et équipements laissés en place dans les alvéoles après leur remplissage) ;
- la robustesse des équipements développés pour les opérations de retrait et la vérification de leurs performances au moyen d'essais ;
- la surveillance des conditions de retrait ;
- l'aptitude à la déconstruction des ouvrages de fermeture partielle de Cigéo et à la remise en service de l'installation souterraine pour un éventuel retrait et sa vérification au moyen d'essais ;
- l'intégration à la conception de dispositions conservatoires ;
- la réalisation d'opérations d'exploitation spécifiques utiles dans le cadre d'un éventuel retrait (essais de mise en service, contrôles, gestion des connaissances) ;
- la réévaluation périodique des conditions de retrait.

Les éléments techniques et organisationnels associés à ces points sont présentés dans les chapitres ci-après.

3.3 Robustesse des conteneurs, des alvéoles et des équipements laissés en place dans les alvéoles après leur remplissage

3.3.1 Définition

La robustesse est la capacité d'un composant, d'un équipement ou d'un système à fonctionner correctement dans une gamme élargie de conditions d'environnement (chaleur, gel, gaz, eau liquide, humidité relative, sécheresse, vibration, déformations géométriques, pression, présence de contamination, vieillissement, après un choc…) ou à être tolérant à la défaillance d'une partie de ses composants ou aux agressions externes. Le caractère robuste des composants favorise la sûreté en exploitation, la sûreté après fermeture et la réversibilité, notamment les conditions permettant la récupérabilité des colis.

Dans le cas de Cigéo, les caractéristiques du Callovo-Oxfordien et les fonctions et les exigences de conception retenues pour l'installation souterraine contribuent à l'établissement de conditions d'environnement favorables à la durabilité des composants, en particulier durant la période d'exploitation. Par exemple, l'essentiel de l'installation souterraine, en particulier les alvéoles, est à l'abri de phénomènes cycliques marqués (température et humidité relative) qui peuvent être présents en surface. Les températures sont limitées à l'intérieur du stockage et dans le Callovo-Oxfordien.

Compte tenu de la durée de la période d'exploitation séculaire envisagée pour Cigéo, seuls des composants et des équipements robustes et durables peuvent conserver les caractéristiques leur permettant d'assurer leur fonction au cours d'éventuelles opérations de retrait de colis de stockage.

Les composants du système de stockage pour lesquels la robustesse et la durabilité sont recherchées en lien avec la récupérabilité sont les conteneurs de stockage, les alvéoles et les équipements laissés dans les alvéoles remplis (intercalaires, blocs de radioprotection, rails…).[8] Concrètement, leur robustesse et leur durabilité pour d'éventuelles opérations de retrait dépendent de leur dimensionnement initial qui prend en compte le vieillissement attendu en lien avec les différentes sollicitations en stockage.

Les bases de conception et principales hypothèses de dimensionnement prises pour la conception de ces composants et équipements sont présentées dans les sous-chapitres ci-après, au regard des sollicitations reçues.

Pour une éventuelle opération de retrait (scénarios « hypothétiques »), certains équipements utilisés pour le retrait, comme les hottes, les chariots et les équipements de manutention dans les cellules de manutention des alvéoles MA-VL, en particulier ceux qui sont mis sous cocon, pourront être remplacés s'ils ne sont plus utilisables ou s'ils sont devenus obsolètes au moment du retrait. Leur conception robuste offre des possibilités de réutilisation, mais elle n'est pas à proprement parler nécessaire à la mise en œuvre des opérations de retrait.

Les installations de surface, galeries et liaisons surface-fond sont conçues et dimensionnées pour contribuer activement aux fonctions d'exploitation jusqu'à la fermeture définitive du stockage. Elles sont disponibles, maintenables ou remplaçables, sur toute la durée d'exploitation du stockage ce qui permet de garantir leur disponibilité pour le retrait des colis.

3.3.2 Robustesse des conteneurs de stockage MA-VL

3.3.2.1 Les fonctions des conteneurs de stockage MA-VL

Pendant l'exploitation de Cigéo, les principales fonctions des conteneurs de stockage MA-VL sont les suivantes :

En situation normale de fonctionnement

- permettre la manutention des colis de stockage lors des opérations de mise en stockage et lors d'éventuelles opérations de retrait ;
- permettre le gerbage des colis de stockage dans l'alvéole ;
- permettre l'évacuation des gaz produits par les colis primaires pour éviter les risques d'explosion ;[9]
- confiner les substances radioactives non gazeuses à un niveau de performance acceptable vis-à-vis de la conception de l'alvéole MA-VL ;
- permettre l'identification des colis de stockage ;

En situation incidentelle et accidentelle[10]

- protéger les colis primaires des sollicitations thermiques et mécaniques ;
- atténuer la dispersion des contaminants en cas de chocs ;
- préserver la fonction de manutention.

Certaines fonctions complémentaires associées au conteneur de stockage MA-VL sont présentées dans la partie du DOS relative à l'exploitation (6).

[8] Des opérations de remise en conformité (jouvence, entretien) voire des actions correctives sont toujours possibles pour les composants accessibles, hors des alvéoles.

[9] La majorité des colis primaires ne produit pas ou produit des quantités non significatives de gaz de radiolyse.

[10] Le DORec ne couvre pas les situations incidentelles et accidentelles (cf. § du 1.4.3 présent document). Les fonctions du conteneur dans ces situations sont rappelées car certaines options de dimensionnement qui leurs sont associées permettent de couvrir, avec des marges, les situations correspondant au fonctionnement normal.

Toutes les fonctions du conteneur de stockage MA-VL peuvent jouer un rôle en cas de retrait, notamment en contribuant à la sûreté. Toutefois, la fonction principale qui rend l'opération techniquement faisable avec les moyens prévus pour le retrait, et qu'il importe de garantir sur la durée d'exploitation de Cigéo en lien avec la récupérabilité, est la capacité du conteneur de stockage à permettre la manutention.

3.3.2.2 Sollicitations des conteneurs de stockage MA-VL en situation normale de stockage

En situation normale de stockage pendant l'exploitation de Cigéo, les conteneurs de stockage MA-VL sont soumis à des sollicitations liées à leurs conditions d'environnement.

Les conteneurs de stockage MA-VL sont soumis à des sollicitations thermiques liées :

- aux fluctuations climatiques de surface, transportées dans le stockage par l'air de ventilation. Celles-ci s'amortissent avec le linéaire parcouru dans le stockage (la température de la roche est d'environ 22°C à 500 m de profondeur) ;
- à la puissance thermique résiduelle des déchets. Elle peut conduire à une élévation de température hétérogène dans l'alvéole (accumulation de la chaleur dans l'air de ventilation le long de l'alvéole).

Ces variations thermiques sont cependant limitées en amplitude et en fréquence par le dimensionnement du stockage. De plus, l'exigence de respect des critères thermiques des alvéoles (65°C dans les bétons) permet d'éviter une altération préjudiciable des conteneurs de stockage.

Du point de vue des sollicitations hydrauliques/hydriques, en lien avec les conditions thermiques discutées ci-avant, les conditions hygrométriques de l'air au sein du stockage sont sèches en moyenne annuelle. Elles sont globalement favorables à la durabilité des conteneurs de stockage. Il n'y a pas d'accumulation d'eau liquide dans les alvéoles MA-VL sur toute la durée de l'exploitation de Cigéo.

Les sollicitations chimiques sont corrélées aux conditions hydrauliques au contact des colis de stockage. Pendant toute la phase d'exploitation, en l'absence d'accumulation d'eau liquide au contact des colis de stockage, les sollicitations chimiques sont *de facto* limitées. Les conteneurs de stockage MA-VL sont soumis principalement à la carbonatation atmosphérique. On notera de plus que la présence d'espèces chimiques naturelles ou anthropiques potentiellement agressives est très limitée dans l'atmosphère au contact des colis de stockage pour les raisons suivantes :

- la distance à la mer (350 km avec la Manche) confère sur le secteur une très faible charge saline de l'atmosphère ;
- l'absence de machine thermique dans la partie en exploitation nucléaire de l'installation souterraine (circulation sur rail, funiculaire à câbles, pont gerbeur) limite les sources de polluants chimiques au sein de l'installation souterraine (NO_x, CO_2,…).

Selon leur nature, certains déchets MA-VL peuvent générer des sollicitations chimiques à l'intérieur du conteneur de stockage dans le cas où ils relâcheraient des produits de dégradation solides (sels, complexants) suite à perte de confinement du colis primaire. Toutefois, l'absence d'eau liquide dans les conteneurs de stockage MA-VL sur toute la période d'exploitation garantit que ces produits de dégradation ne sont pas susceptibles de les altérer significativement.

Le débit de dose maximum dans le conteneur de stockage en béton est globalement inférieur au Gy/h pour la plupart des familles de colis de déchets. Il peut atteindre quelques dizaines de Gy/h pour les colis les plus irradiants. Par ailleurs, le débit de dose décroît :

- dans l'espace : en fonction de l'épaisseur du conteneur de stockage ;
- dans le temps : Pour les colis CSD-C les plus irradiants, il décroît de 50 Gy/h environ à la production, à 15 Gy/h après 10 ans et 1,5 Gy/h après 50 ans.

La présence de jeux fonctionnels entre, d'une part la voute et les parois de l'alvéole, d'autre part les colis de stockage, préserve, par conception, les colis de stockage d'un chargement mécanique externe par les argilites sur la période d'exploitation de Cigéo. Les colis de stockage ne sont donc soumis qu'à

leur poids propre ou au poids des colis gerbés, ainsi qu'à des contraintes thermomécaniques propres pour les déchets MA-VL faiblement exothermiques pendant la période thermique.

En situation normale de stockage, les sollicitations des conteneurs de stockage MA-VL sont peu sévères. Les conditions de stockage sont favorables au maintien de leurs fonctions, en particulier de manutention.

3.3.2.3 Conception des conteneurs de stockage MA-VL

Le colis de stockage MA-VL est constitué (cf. Figure 3-1) d'un conteneur en béton armé, d'un couvercle vissé en béton armé et des colis primaires.

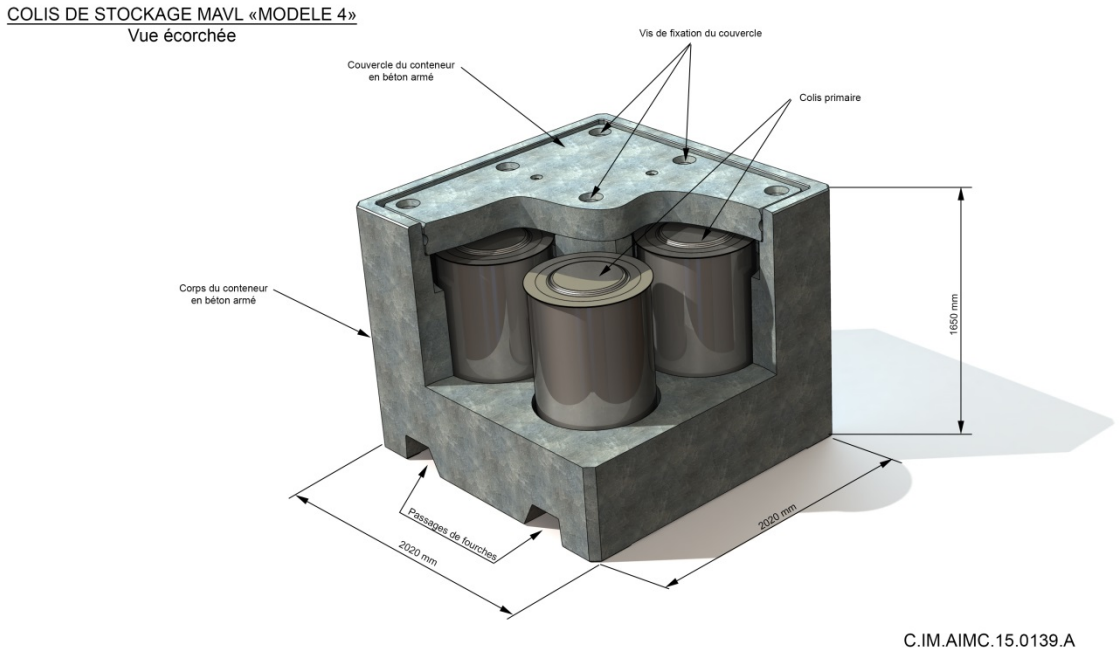


Figure 3-1 Schéma de principe d'un colis de stockage MA-VL (sur la base des études d'APS)

Le corps du conteneur de stockage est constitué d'une seule pièce en béton armé. Il s'agit d'un béton « hautes performances » retenu pour sa résistance aux sollicitations statiques et dynamiques *a minima* sur la durée d'exploitation.

Un conteneur de stockage présente une ou plusieurs réservations (logement) dans lesquelles les colis primaires sont disposés. Le regroupement de plusieurs colis primaires dans un même conteneur de stockage vise à minimiser les opérations de manutention et à réduire les flux de transfert des colis de stockage. Dans un objectif de standardisation et de mutualisation des équipements de transfert, tous les conteneurs de stockage présentent une forme de parallélépipède et intègrent les passages de fourches permettant leur manutention. Les dimensions des passages de fourches sont communes à tous les modèles de conteneurs de stockage.

Le couvercle est en béton armé préfabriqué. Ce dernier est vissé au corps du conteneur de stockage par l'intermédiaire d'un système de fixation composé d'un insert muni d'un pas de vis ancré dans le corps, d'un insert ancré dans le couvercle et de vis. Les inserts ont été spécialement conçus pour constituer un système d'anti-cisaillement en cas de chute.

Pour certains colis primaires, afin d'améliorer la capacité de confinement du colis de stockage, un liant de clavage pourrait, le cas échéant, être injecté après fermeture du conteneur de stockage dans l'interstice résiduel entre le corps du conteneur et le couvercle. Ce liant peut être découpé mécaniquement si une opération de réouverture des colis de stockage était décidée.

Concernant l'identification des colis de stockage, plusieurs types de marquages peuvent être apposés sur le conteneur de stockage MA-VL (marquage avec de la peinture, marquage par étiquette, marquage dans le béton). Tous les marquages impliquant un perçage du béton sont exclus afin de ne pas mettre en cause la durabilité. A ce stade des études, le type de marquage n'a pas encore été choisi. Cependant, le marquage à la peinture semble présenter à ce stade l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et de pouvoir être appliqué sur les quatre faces des colis et sur le couvercle. Compte tenu des conditions d'environnement (absence d'eau liquide et hygrométrie maîtrisée) ce marquage pourrait être durable sur toute la durée d'exploitation.

Les options de conception des conteneurs de stockage MA-VL (conteneurs préfabriqués parallélépipédiques intégrant des passages de fourches, systèmes de fermeture) et le choix de leurs matériaux constitutifs (béton armé haute performance) ont été retenus pour répondre à l'ensemble de leurs fonctions sur toute la durée d'exploitation, en particulier la fonction de manutention, au regard des sollicitations auxquelles ils sont soumis en stockage.

3.3.2.4 Dimensionnement du conteneur de stockage MA-VL

Le dimensionnement des voiles du conteneur de stockage en béton et de son ferraillage a été déterminé au moyen des référentiels en vigueur (21) dans l'objectif de lui conférer une résistance mécanique à la chute. En effet, la résistance au gerbage n'est pas dimensionnante vis à vis de la classe de béton à retenir ou de l'épaisseur du conteneur. On notera qu'en situation de gerbage, la descente de charges d'un colis de stockage sur un autre se fait par les voiles du conteneur de stockage. Aucun effort n'est appliqué au couvercle.

En conditions normales de manutention, le béton d'enrobage est suffisamment résistant pour ne pas s'épaufrer ou faire d'éclats en cas de contact (fourches de manutention, dalle du radier de l'alvéole…).

La formulation du béton a été retenue pour, dans tous les cas, assurer la manutention des colis de stockage après un éventuel incendie. De plus, pour les conteneurs de stockage dédiés aux déchets bitumés, la formulation et l'épaisseur des parois de béton (environ 20 cm au stade de l'APS) sont choisies dans l'objectif d'assurer leur protection thermique.

La durabilité d'un béton armé, tel que celui constituant les conteneurs de stockage, sur une durée *a minima* séculaire, dépend d'une combinaison d'éléments. Elle requiert l'utilisation d'un matériau performant (aussi bien en termes de choix de matières premières que de formulation au sens des quantités de matières utilisées) et nécessite une mise en œuvre soignée du béton notamment autour des armatures. Dans un objectif de durabilité, le choix s'est porté sur un ciment composé (contenant des cendres volantes et du laitier), résistant aux sulfates (PM-ES) et sur des granulats non réactifs à l'alcali-réaction. La composition des bétons vise également à améliorer la résistance dans le temps ; une teneur en ciment élevée et une teneur en eau réduite permettent de limiter les vides internes au matériau et donc sa fragilité.

Une optimisation des « indicateurs de durabilité » a également été menée. Ces indicateurs sont définis dans les textes de référence (22). Il s'agit de la porosité à l'eau, la perméabilité au gaz et le coefficient de diffusion des ions chlorure. Dans le cas des formulations étudiées pour les conteneurs de stockage, ces indicateurs ont été optimisés au maximum de manière à garantir la meilleure tenue dans le temps. La perméabilité au gaz a fait l'objet d'une attention particulière puisqu'elle régit également la capacité du conteneur de stockage en béton à évacuer les gaz de radiolyse. Dans ce cas, un optimum a été recherché. Sur ce point, il faut souligner que le maintien du couvercle par des vis offre un chemin d'évacuation privilégié aux gaz générés au sein du colis de stockage (interface entre le couvercle et le corps du conteneur). Dans le cas des colis clavés, les propriétés du liant ont été établies selon les mêmes principes de formulation que pour le conteneur de stockage, dans l'objectif de garantir l'évacuation du gaz tout en assurant la durabilité du matériau.

Les bétons ont par ailleurs été formulés de telle sorte que leur mise en œuvre permette de s'assurer d'un très bon remplissage des coffrages, sans vide à travers le réseau d'armatures, ni défauts de surface, artefacts qui peuvent s'avérer propices à la pénétration d'agents agressifs. Une formulation

« auto-plaçante »[11] contribue à la qualité de la mise en œuvre. La cure sera soignée de manière à limiter le retrait naturel du béton lors du phénomène de dessiccation. Ceci permet de réduire le risque de fissuration et donc d'améliorer la durabilité du béton.

L'épaisseur d'enrobage des armatures a été déterminée en tenant compte de la durabilité *a minima* séculaire visée pour le conteneur de stockage et des conditions d'environnement attendues dans l'alvéole. A ce stade des études, une épaisseur d'enrobage nominale[12] de 40 mm a été définie pour se prémunir de la corrosion des armatures (21). La qualité du matériau permet également de ralentir la pénétration des agents agressifs. Les classes d'environnement prises en compte sont la XA2 au regard des risques liés aux attaques chimiques et la XC1 au regard des risques liés à la carbonatation (23).

Les critères de dimensionnement des conteneurs de stockage MA-VL (ferraillage, formulation du béton, épaisseur d'enrobage) sont retenus pour qu'ils assurent leurs fonctions sur toute la durée d'exploitation, en particulier la fonction de manutention, au regard des sollicitations auxquelles ils sont soumis en stockage.

3.3.2.5 Fabrication du conteneur de stockage MA-VL

Après fabrication d'un conteneur en béton armé, un temps de maturation sera observé avant sa sortie d'usine.

Compte tenu de l'impossibilité de réaliser une maintenance sur les colis stockés, de nombreux contrôles sont prévus en usine et sur Cigéo pour réduire et pour détecter le risque de défaut de fabrication. Le programme de contrôle qualité en usine n'est pas encore défini à ce stade, il pourrait comporter par exemple :

- des contrôles de la qualité des matières premières utilisées ;
- des mesures de la résistance mécanique et du retrait sur éprouvettes ;
- des contrôles dimensionnels et de masse ;
- des vérifications de la qualité du parement et des critères d'acceptation en termes de bullage et de défauts de surface ;
- des vérifications visuelles de l'absence d'éclat ou d'épaufrure.

Une attention particulière sera portée à la qualité de la réalisation des conteneurs de stockage MA-VL en usine afin de garantir qu'ils sont conformes et répondent à leurs fonctions.

3.3.2.6 Cas des colis primaires massifs

Pour certains colis primaires très massifs (CEA-231, CEA-290, CEA-300 et CEA-450), deux modèles de conteneurs de stockage MA-VL en acier sont spécifiquement développés. Ils permettent, à fonction égale, de conserver une standardisation des moyens de manutention mis en œuvre dans Cigéo. Ces conteneurs de stockage MA-VL en acier sont constitués d'un corps et d'un couvercle vissé. Ils contiennent un seul colis primaire.

Le dimensionnement de ces conteneurs de stockage tient compte d'une épaisseur d'acier sacrificielle établie sur la base d'une vitesse de corrosion généralisée de 10 µm/an. Cette valeur est pénalisante car il n'y a pas d'accumulation d'eau dans les alvéoles MA-VL sur toute la période d'exploitation (cf. § 3.3.2.2 du présent document).

Cette option technologique est utilisée pour un très petit nombre de colis primaire (240 colis primaires) dont la réception sur Cigéo est actuellement prévue à l'horizon 2050. Ces conteneurs répondront aux mêmes fonctions et à des objectifs de performance et démarche de contrôles de leur réalisation similaires à ceux des conteneurs de stockage en béton.

[11] Elle ne nécessite pas de vibration pour sa mise en place.
[12] Au sens de l'Eurocode, l'épaisseur d'enrobage nominale est la somme de l'épaisseur d'enrobage minimale définie en fonction de la durabilité recherchée et d'une marge liée aux tolérances d'exécution.

3.3.3 Robustesse des conteneurs de stockage HA

3.3.3.1 Les fonctions des conteneurs de stockage HA

Pendant l'exploitation de Cigéo, les principales fonctions du conteneur de stockage HA sont les suivantes :

- permettre les manutentions des colis de stockage lors des opérations de mise en stockage et lors d'un éventuel retrait ;
- assurer le confinement des substances radioactives en toute situation ;
- limiter le débit de dose au contact du conteneur de stockage pour éviter les phénomènes de corrosion sous rayonnement dans l'alvéole ;
- permettre l'identification des colis de stockage.

Toutes les fonctions du conteneur de stockage HA peuvent jouer un rôle en cas de retrait, notamment en contribuant à la sûreté. Toutefois, la fonction principale qui rend l'opération techniquement faisable avec les moyens prévus pour le retrait, et qu'il importe de garantir sur la durée d'exploitation de Cigéo en lien avec la récupérabilité, est la capacité du conteneur de stockage à permettre la manutention lors d'un éventuel retrait de l'alvéole (compte tenu du dimensionnement du conteneur, la perte de sa fonction de confinement est exclue).

Certaines fonctions complémentaires associées au conteneur de stockage HA sont présentées dans la partie du DOS relative à l'exploitation (6).

3.3.3.2 Sollicitations des conteneurs de stockage HA en situation normale de stockage

En situation normale de stockage pendant l'exploitation de Cigéo, les conteneurs de stockage HA sont soumis à des sollicitations liées à leurs conditions d'environnement.

Les conteneurs de stockage HA sont soumis à des <u>sollicitations thermiques</u> liées à l'activité des colis de déchets vitrifiés qu'ils contiennent. L'entreposage des colis primaires dans les installations des producteurs de déchets avant réception sur Cigéo permet de faire décroître significativement leur puissance thermique. Par ailleurs, afin de protéger les propriétés des argilites du Callovo-Oxfordien et de garantir la maîtrise des phénomènes physico-chimiques, l'installation est conçue et exploitée pour limiter la température des conteneurs de stockage à 100° C. Ce domaine de température n'altère pas les composants en acier.

Le chemisage de l'alvéole n'étant pas étanche, de l'eau relâchée par la roche est susceptible de pénétrer dans l'alvéole. Dans les périodes où cette eau est extraite de l'alvéole, elle s'écoule par gravité et elle est évacuée en tête d'alvéole. La présence des patins évite le contact entre le chemisage et les conteneurs de stockage et libère l'espace, sous les conteneurs, pour l'écoulement de cette eau. Elle n'est donc pas susceptible de s'accumuler au contact des conteneurs de stockage et de générer des <u>sollicitations hydriques/hydrauliques</u>. De plus, les colis de stockage constituant la source de chaleur dans l'alvéole, ils ne sont pas *a priori* affectés par d'éventuels phénomènes de condensation qui, s'ils se produisent, affecteront les parties les plus froides (chemisage, intercalaires). Après obturation de l'alvéole dans le cadre des opérations de fermeture partielle du stockage (passage aux niveaux 3 et 4 de l'échelle de récupérabilité), l'eau n'est plus extraite. Elle peut s'accumuler dans l'alvéole, entrer en contact avec les conteneurs de stockage, voire en baigner certaines parties. Toutefois, dans cette situation, les teneurs en oxygène sont très faibles et les phénomènes de corrosion deviennent très lents. Il est exclu qu'ils subissent, dans ces conditions, des altérations préjudiciables à leurs fonctions sur la durée d'exploitation de Cigéo.

Les conteneurs de stockage sont également soumis à la <u>sollicitation chimique</u> que constitue la corrosion en milieu humide (présence de vapeur ou d'eau liquide). Cette sollicitation connait deux grandes phases. En premier lieu un transitoire oxydant limité dans le temps par des dispositions de conception, notamment la présence de la bride amovible placée en tête d'alvéole (cf. § 2.3.4.4 du présent document). Puis, après consommation de l'oxygène, la mise en place d'un régime de corrosion généralisé caractérisé par des vitesses de corrosion lentes associées à des conditions d'environnement

anoxiques.[13] Après obturation de l'alvéole dans le cadre des opérations de fermeture partielle du stockage (passage aux niveaux 3 et 4 de l'échelle de récupérabilité), le renouvellement de l'oxygène dans la partie utile de l'alvéole est encore plus limité.

Le débit de dose au contact des conteneurs de stockage est en théorie susceptible de créer par radiolyse des espèces oxydantes. C'est pourquoi, l'épaisseur du conteneur (virole, couvercle et fond) permet de limiter ce débit de dose à la valeur de 10 Gy/h en tous points du colis de stockage et de maintenir le conteneur dans des conditions d'environnement favorables, plus particulièrement vis-à-vis d'une corrosion oxydante.

Pendant l'exploitation, le contact entre le conteneur de stockage et le chemisage de l'alvéole n'est effectué que par l'intermédiaire des patins. Pour toute sollicitation mécanique, il ne subit que son poids propre.

En situation normale de stockage, les sollicitations subies par les conteneurs de stockage HA sont peu sévères pour un composant en acier. Les conditions de stockage sont globalement favorables au maintien de leurs fonctions, en particulier de manutention. Les sollicitations chimiques (corrosion) sont prises en compte à la conception.

3.3.3.3 Conception et dimensionnement des conteneurs de stockage HA

Le conteneur de stockage HA est constitué des composants suivants :

- un corps cylindrique en acier massif non allié (forgé pour appareil à pression de type P 285 NH), constitué d'une virole d'épaisseur comprise, au stade de l'APS, entre 53 et 65 mm ;[14]
- un fond et d'un couvercle en acier massif (d'épaisseur du même ordre que celle du corps du conteneur), de la même nuance d'acier que le corps du conteneur de stockage, soudés à la virole par faisceau d'électrons ;
- 4 patins en céramique massive chacun bloqués au corps du conteneur de stockage par une clavette.

Un conteneur de stockage peut recevoir 1 ou 2 colis primaires HA. [15]

[13] L'oxygène est consommé par la corrosion et, sans renouvellement, sa concentration décroît dans l'alvéole.
[14] Ces épaisseurs pourraient encore faire l'objet d'optimisation afin de limiter la quantité d'acier à ce qui est strictement nécessaire vis-à-vis du critère de débit de dose.
[15] Des colis de stockage biplace sont prévus pour les colis HA0 de l'AVM et pour des colis de l'installation PIVER.

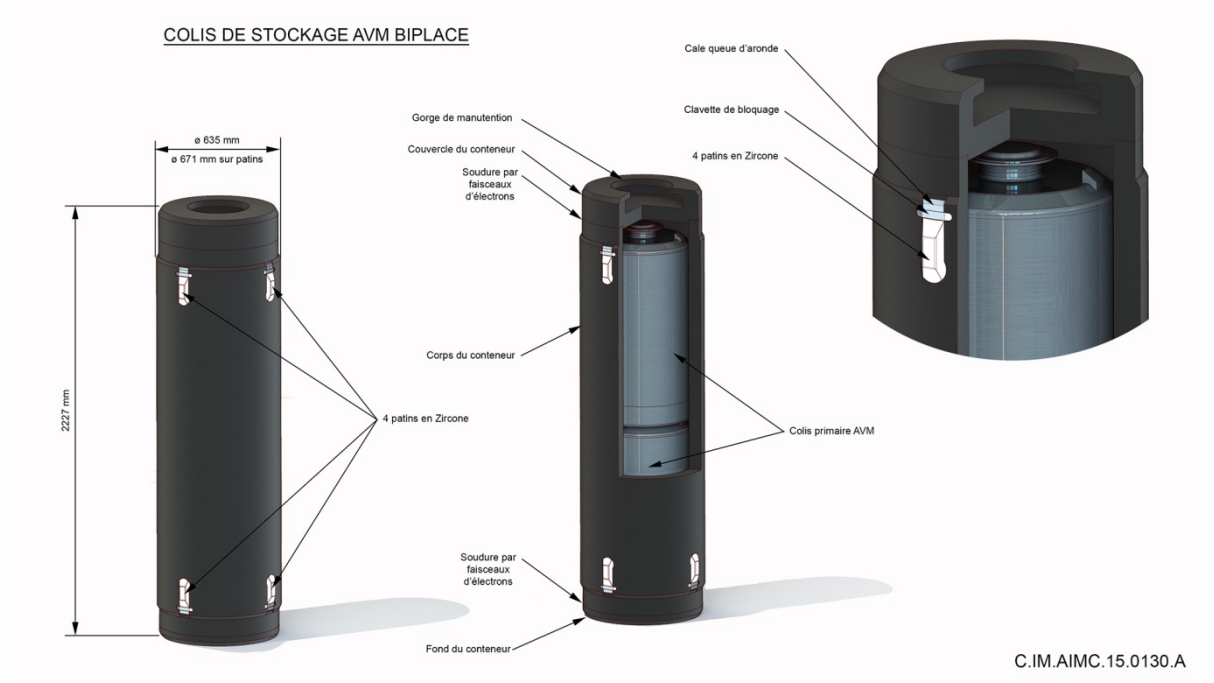


Figure 3-2 Colis de stockage de déchets vitrifiés de type AVM biplace (sur la base des études d'APS)

Le couvercle du conteneur de stockage est muni d'une gorge de préhension dans laquelle se loge le grappin du robot tracteur utilisé pour un éventuel retrait (cf. § 3.5.2 du présent document).

Les patins en céramique sont insérés dans une rainure en forme de queue d'aronde et bloqués par une clavette soudée à une cale. Chaque rainure est usinée dans la virole du conteneur de stockage.

Le choix du matériau et le dimensionnement du conteneur de stockage prend pour hypothèse que la corrosion généralisée est le phénomène prépondérant en termes de corrosion. Afin de résister aux sollicitations chimiques, l'Andra retient, en solution de référence pour l'acier forgé, des exigences complémentaires à la norme de référence vis-à-vis, d'une part de la propreté inclusionnaire (notamment une limitation de la teneur en phosphore et en oxygène), d'autre part de sa structure métallurgique. La réduction du taux d'impuretés et d'inclusions limite la corrosion anodique. La structure « ferrite-perlite » fine et homogène est peu fragile et peu sensible à la corrosion localisée et à la corrosion sous contrainte. Sur la période d'exploitation séculaire de Cigéo, les phénomènes de corrosion n'impactent pas une épaisseur supérieure à quelques millimètres. L'épaisseur du conteneur de stockage permet de couvrir largement les phénomènes de corrosion.

Les autres sollicitations (thermique, mécanique…) sont largement couvertes par la robustesse confiée au conteneur de stockage par son épaisseur. Elles ne sont pas susceptibles de l'altérer notablement pendant la période d'exploitation.

Pour les patins en céramique, la zircone a été retenue pour son caractère inerte pendant la phase de réversibilité évitant ainsi le risque de « collage par corrosion » du colis de stockage sur le chemisage. La rugosité des patins en zircone et le coefficient de frottement sont favorables aux opérations de mise en place et de retrait, même en conditions de corrosion du chemisage et du colis de stockage. La fonction d'identification par gravure sur le patin en céramique est retenue à ce stade. Elle est, par nature, non sensible à la corrosion et durable sur la durée d'exploitation du stockage.

La géométrie de la rainure de fixation des patins a été dimensionnée pour prendre en compte la corrosion de la virole. L'épaisseur des patins (de l'ordre de 30 mm) est dimensionnée pour assurer le non-contact du colis de stockage sur le chemisage tout au long de la période d'exploitation du stockage.

Les options de conception des conteneurs de stockage HA (conteneurs soudés massifs acier), le choix de leurs matériaux constitutifs (acier forgé peu fragile et peu sensible aux corrosions sous contrainte et localisée, zircone des patins) et leurs critères de dimensionnement, notamment l'épaisseur des conteneurs, ont été retenus pour répondre à l'ensemble de leurs fonctions sur toute la durée d'exploitation, en particulier la fonction de manutention, au regard des sollicitations auxquelles ils sont soumis en stockage.

3.3.3.4 Fabrication du conteneur de stockage

L'acier non allié à bas carbone a été choisi pour le caractère prédictible de sa cinétique de corrosion. Cette prédiction est fiabilisée par le caractère codifié et normalisé des techniques d'élaboration et de contrôle du conteneur de stockage. Ces normes définissent ses caractéristiques mécaniques, dimensionnelles et métallurgiques. Elles garantissent que les propriétés des composants du colis sont reproductibles et constantes. Par ailleurs, le forgeage des composants du conteneur de stockage est suivi d'un traitement thermique de normalisation qui réduit les contraintes résiduelles et affine la structure.

Le procédé de soudage du fond et du couvercle sur la virole du conteneur de stockage est le soudage sous vide par faisceau d'électrons. Il évite l'apport d'hydrogène dans le métal fondu de la zone soudée et évite ainsi les phénomènes de fragilisation. Les soudures en pleine pénétration sont réalisées circulairement. L'intensité de la contrainte résiduelle dans le conteneur de stockage (corps et couvercle) est limitée à un niveau aussi faible que possible par un traitement de détensionnement après chaque soudage. Des essais réalisés par l'Andra montrent qu'il est possible de réduire les contraintes résiduelles de traction à environ 1/3 de la limite d'élasticité du métal de base. Après traitement de détensionnement thermique, les duretés en tout point des joints soudés (zone affectée thermiquement et zone fondue) n'excèdent pas la limite de 250 HV (Hardness Vickers) préconisée pour améliorer sa résistance à la fragilisation par l'hydrogène. La propreté inclusionnaire de l'acier, notamment les teneurs réduites en soufre et en phosphore, favorise la bonne qualité des soudures (24).

Le soudage du fond sur la virole est effectué en usine. Le soudage du couvercle sur la virole est effectué dans Cigéo (après chargement des colis de déchets vitrifiés).

Compte tenu de l'impossibilité de réaliser une maintenance sur les colis stockés, de nombreux contrôles sont prévus en usine et sur Cigéo pour réduire le risque de défaut de fabrication et détecter un éventuel défaut. Le programme de contrôle qualité en usine n'est pas encore défini à ce stade, il pourrait comporter par exemple :

Avant soudage, sur chaque pièce, pour s'assurer de sa conformité

- examen visuel de chaque pièce forgée ;
- contrôle dimensionnel après usinage final ;
- contrôle par ultrasons à 100 % du volume ;

Après soudage, en usine et dans Cigéo

- contrôles par ultrasons pour la détection d'éventuels défauts de type manque de fusion, fissures et cavités internes ;
- contrôles par ondes rampantes ou par courants de Foucault pour la détection d'éventuels défauts de surface.

Des contrôles sont également réalisés sur les patins en céramique afin de s'assurer de leur conformité (matière, géométrie, caractéristiques mécaniques).

Une attention particulière sera portée à la qualité de la réalisation des conteneurs de stockage HA en usine et lors de leur assemblage sur Cigéo afin de garantir qu'ils sont conformes et répondent à leurs fonctions, notamment leurs fonctions de manutention.

3.3.4 Robustesse des alvéoles

3.3.4.1 Fonctions des alvéoles pour la récupérabilité

La conception des alvéoles intègre certaines fonctions nécessaires à la récupérabilité. Ces fonctions sont les suivantes :

- la préservation des jeux de manutention des colis ;
- la préservation des conditions de fonctionnement des équipements de retrait : intégrité du supportage des équipements et préservation des espaces nécessaires au déplacement des engins de manutention.

La conception vise à préserver ces fonctions sur toute la durée d'exploitation de Cigéo.

3.3.4.2 Alvéoles MA-VL

Lors d'une opération de retrait, les jeux de manutention correspondent à l'espace nécessaire dont il faut disposer autour des colis pour qu'ils puissent être soulevés au moyen du pont et déplacés par translation, depuis leur position de stockage, jusqu'à la cellule de manutention, sans heurter les parois de l'alvéole ou les autres colis de stockage. Il importe donc de concevoir et de dimensionner les alvéoles MA-VL pour éviter des dégradations dont l'ampleur (déformation ou projection de débris sur les colis) mettrait en cause le jeu de manutention disponible initialement lors de leur remplissage.

Au stade de l'APS, les jeux de manutention minimum prévus pour la mise en place des colis au sein de l'alvéole MA-VL sont les suivants :[16]

- un jeu en voute, au-dessus des piles de colis, supérieur à 17 cm ;
- un jeu latéral, entre les colis et la paroi de l'alvéole, supérieur à 10 cm ;
- un jeu entre les piles de colis de l'ordre de 10 cm.

[16] Les valeurs numériques du chapitre 3.3.4.2 sont données au centimètre près pour une meilleure compréhension de la démarche de dimensionnement des jeux. Toutefois, elles sont susceptibles d'évoluer au cours de l'APD.

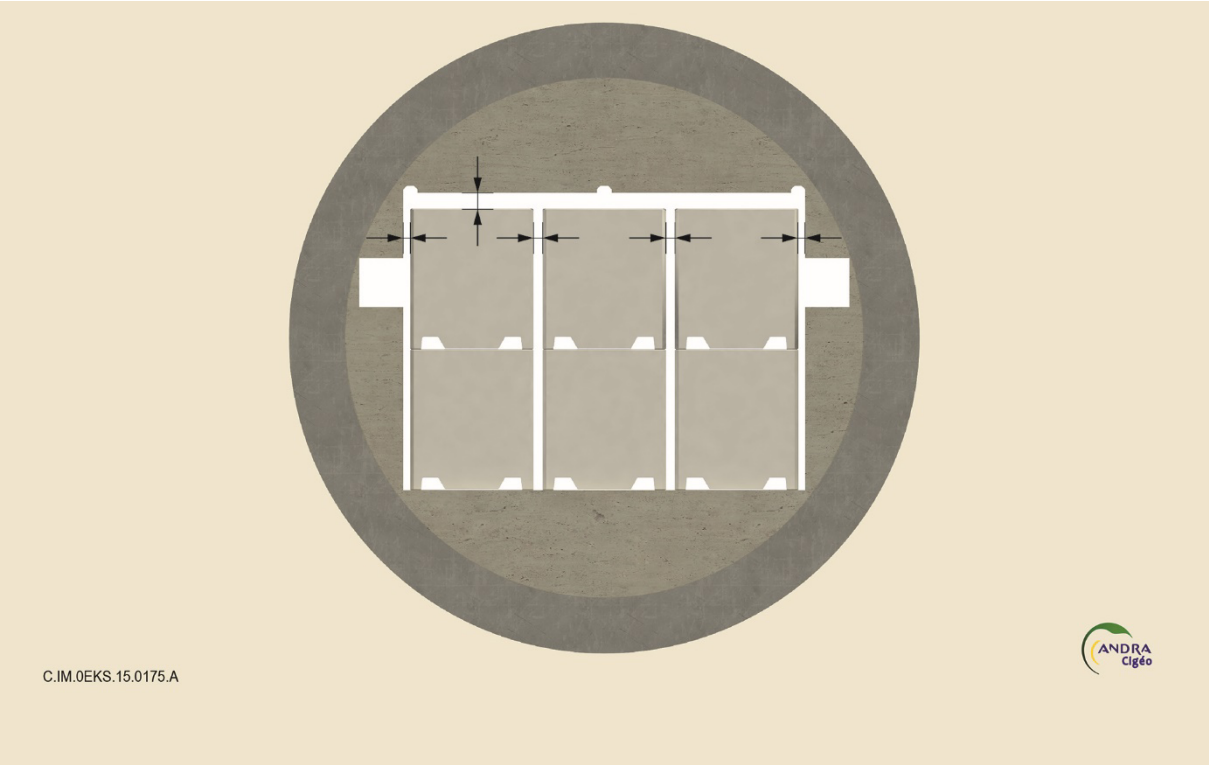


Figure 3-3 Jeux fonctionnels dans l'alvéole MA-VL (sur la base des études d'APS)

Les tolérances de construction sont de l'ordre du centimètre sur chaque plot[17] de bétonnage. Cette valeur faible provient du fait que les bétons du radier, des parois latérales et de la voute sont des bétons qui peuvent être réalisés avec un soin plus grand que le béton du revêtement (béton de structure de l'alvéole de forme cylindrique). De plus, les éventuelles irrégularités peuvent être reprises à la réception des ouvrages.

Les déformations de la partie utile de l'alvéole MA-VL attendues à l'échelle séculaire sont liées aux déformations du béton de structure sous l'effet des poussées du terrain encaissant et de la pression hydrostatique. Les déformations calculées à ce stade sur cette durée sont de l'ordre du centimètre. Une marge de cet ordre pourrait donc être prise en compte dans la définition géométrique de l'espace intérieur de l'alvéole. Pour l'espace sous la voute, on aboutit à 2 cm en additionnant le centimètre de déplacement du radier et le centimètre de déplacement de la voûte.[18]

Les jeux qui seront spécifiés pour la réalisation de l'alvéole MA-VL prendront en compte l'addition des tolérances de construction et des déformations à l'échelle séculaire. Cette démarche pourrait par exemple conduire à spécifier le type de jeux suivants pour les dimensions de la partie utile de l'alvéole :

- de chaque côté : 13 cm (jeu de manutention 10 + tolérance 2 + déformation 1) ;
- sous la voute : 23 cm (jeu de manutention 17 + tolérance 4 + déformation 2).

De plus, des contrôles pendant la construction et à la réception des ouvrages permettront de vérifier la conformité des bétons et de leur mise en œuvre, au regard des spécifications de réalisation. Un niveau de contrôle accru est prévu pour les alvéoles du fait de l'impossibilité de maintenance sur ces ouvrages. La conformité géométrique des alvéoles de stockage et en particularité la section de la partie utile de l'alvéole et la régularité des parois feront également l'objet de contrôles qualité renforcés.

---

[17] Le béton dit « de remplissage » qui constitue la partie utile de l'alvéole est coulé progressivement, par phases. Chaque portion coulée est appelée « plot ».

[18] Pour un dimensionnement robuste du béton de structure, l'approche réglementaire des Eurocodes est utilisée, notamment au travers de coefficients de sécurité partiels. La méthode de conception du revêtement est aussi appliquée au supportage du pont stockeur, qui doit être suffisamment stable sur le long terme pour ne pas remettre en cause les modes de fonctionnement de ce pont.

La conception du pont-stockeur intègre les tolérances de construction de l'alvéole et ses déformations attendues afin de garantir son bon fonctionnement dans cette plage de variation.

Les conditions hygrométriques de l'air au sein des alvéoles MA-VL sont sèches en moyenne annuelle (cf. § 3.3.2.2 du présent document). Elles sont globalement favorables à la durabilité des ouvrages en béton. Ces conditions hydriques conduisent à prévoir une carbonatation des bétons de l'alvéole. Le risque de corrosion des armatures métalliques est maîtrisé par le choix de la formulation du béton, par l'épaisseur d'enrobage et, le cas échéant, par une protection des armatures contre la corrosion.

Certains colis de stockage ayant une puissance thermique résiduelle, certains alvéoles MA-VL peuvent être sollicités thermiquement. Ces sollicitations, couplées ou non à la ventilation, conduisent à une distribution hétérogène de la température dans l'alvéole. Par dimensionnement, ces variations sont néanmoins limitées à 65°C pour l'ensemble des éléments en béton de l'alvéole et ne sont pas de nature à affecter la stabilité mécanique de l'ouvrage.

La préservation des jeux fonctionnels dans la partie utile des alvéoles MA-VL fait l'objet d'une surveillance spécifique pendant l'exploitation de Cigéo (cf. § 3.4 du présent document).

La conception, le dimensionnement et les spécifications de réalisation des alvéoles MA-VL intègrent la récupérabilité. En pratique cela se traduit principalement par un revêtement en béton dimensionné pour assurer la durabilité de l'ouvrage et par la définition de jeux fonctionnels intégrant les tolérances de réalisation et les déformations d'ordre centimétrique attendues sur la durée d'exploitation séculaire de Cigéo.

3.3.4.3 Alvéoles HA

Dans les alvéoles HA, les colis de stockage ne sont pas soulevés, mais poussés par le robot jusqu'à leur position de stockage. Les patins des conteneurs de stockage étant en contact avec le chemisage de l'alvéole en partie inférieure, le jeu de manutention correspond à l'espace libre entre le corps du conteneur et les parois de l'alvéole. La conception et le dimensionnement du chemisage préservent ce jeu de manutention sur toute la durée d'exploitation (à ce stade, une épaisseur d'environ 25 mm d'acier est prévue pour le chemisage). L'exigence pour ce jeu est qu'il n'y ait jamais contact entre le corps du conteneur de stockage et le chemisage lors d'une éventuelle opération de retrait.

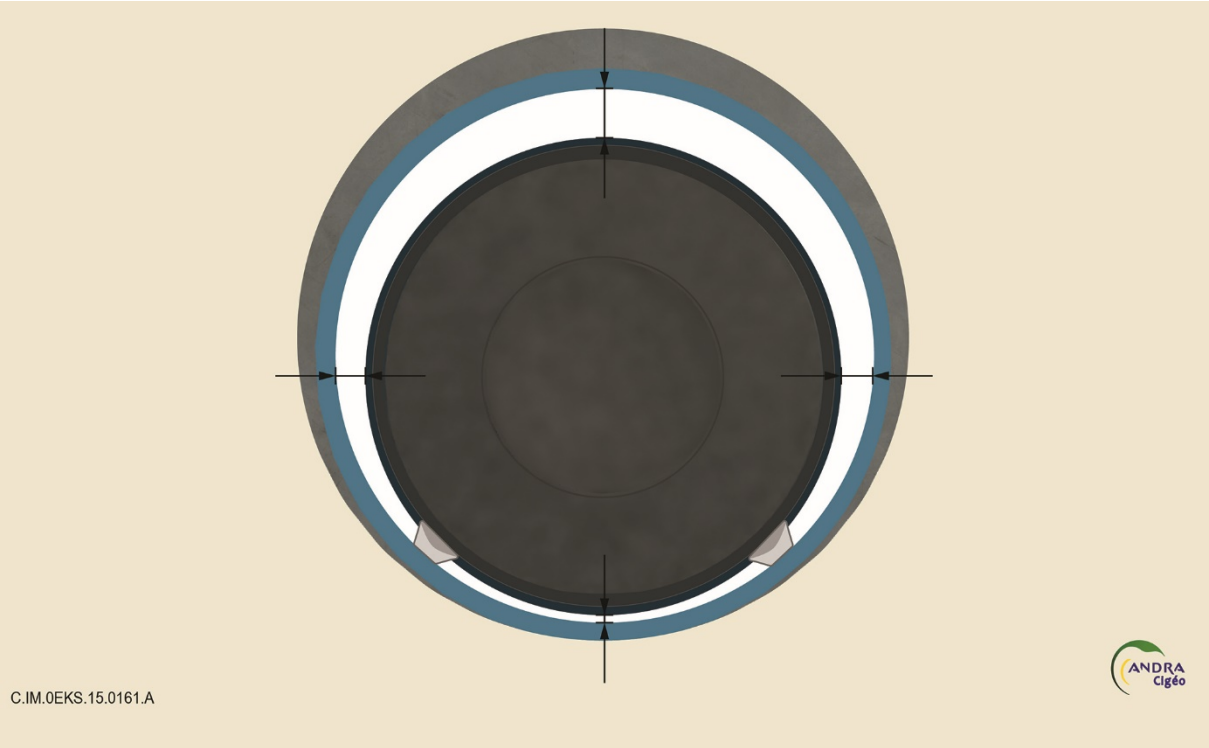


Figure 3-4 Jeux fonctionnels dans l'alvéole HA (sur la base des études d'APS)

Sur la durée de l'exploitation de Cigéo, le comportement mécanique du chemisage est conditionné par les déformations différées des argilites du Callovo-Oxfordien. Sur une période séculaire, ce comportement tend vers un chargement globalement homogène. Les expérimentations réalisées dans le Laboratoire souterrain soulignent une légère ovalisation du chemisage. Cette ovalisation ne met pas en cause la disponibilité des jeux fonctionnels.

Avant la mise en service d'un alvéole, la qualité de sa réalisation sera vérifiée en tenant compte des tolérances de creusement (rectitude), de fabrication et de mise en place du chemisage (alignement des tubes du chemisage, jonction), ainsi que des marges à retenir compte tenu des évolutions différées (ovalisation, dilatation après chargement) attendues sur toute la durée d'exploitation.

La préservation des jeux fonctionnels dans la partie utile des alvéoles HA fait l'objet d'une surveillance spécifique pendant l'exploitation de Cigéo (cf. § 3.4 du présent document).

Le chemisage de l'alvéole ne garantissant pas une étanchéité parfaite, l'eau provenant du terrain peut pénétrer au sein de l'alvéole. Au cours du remplissage de l'alvéole et en attente de son obturation, l'eau éventuellement présente dans l'alvéole est évacuée hors de l'alvéole. En présence de cette eau, même à l'état de vapeur, un phénomène de corrosion du chemisage et des conteneurs de stockage est attendu. Toutefois, celui-ci reste limité, en raison notamment de la pose de la bride en tête d'alvéole qui vise à éviter le renouvellement de l'oxygène (cf. § 2.3.4.4 du présent document). De plus, la mise en place d'un coulis à base de matériau cimentaire en extrados contribue à tamponner le pH de cette eau et à réduire encore la corrosion du chemisage. Dans ce contexte, les cinétiques de corrosion deviennent lentes (quelques µm/an). L'épaisseur d'acier du chemisage, permet de garantir sa

résistance sur toute la période d'exploitation de Cigéo. Par ailleurs, la rouille est un matériau de type pulvérulent qui n'est pas susceptible de venir bloquer la translation du colis dans l'alvéole au cours d'une éventuelle opération de retrait, que les conditions soient sèches ou humides. Les essais menés jusqu'à présent ont montré l'absence de blocage malgré la présence de particules et d'écailles de rouille (cf. § 3.5.3.2 du présent document).

Le chargement de l'alvéole par des colis de déchets vitrifiés se traduit par un dégagement thermique important qui diminue dans le temps avec la décroissance radioactive. Le paroxysme thermique dans les argilites est borné par un critère de température maximale de 100° C (ramené à 90° C pour la conception des alvéoles et incluant une marge de 10° C) et d'un critère thermo-hydro-mécanique. Toutefois, la dilatation longitudinale libre du chemisage en tête d'alvéole empêche tout flambement qui viendrait limiter le jeu de manutention.

La conception, le dimensionnement et les spécifications de réalisation des alvéoles HA intègrent la récupérabilité et l'exigence d'absence de contact entre le corps du conteneur et le chemisage lors d'une éventuelle opération de retrait. En pratique, cela se traduit principalement par un chemisage robuste en acier et par la définition de jeux fonctionnels intégrant les tolérances de réalisation et l'ovalisation attendue sur la durée d'exploitation séculaire de Cigéo.

3.3.5 Équipements laissés en place dans les alvéoles après remplissage

3.3.5.1 Dans les alvéoles MA-VL

Les voies de roulement du pont-stockeur sont laissées en place avec l'ensemble de leurs systèmes de fixation dans l'alvéole de stockage, ainsi que les systèmes de prise de références de positions du pont-stockeur et les supports de ses câbles d'alimentation électrique (par exemple : diabolo). Ces voies de roulement sont dimensionnées pour être réutilisées pour la circulation du pont lors d'une éventuelle opération de retrait.

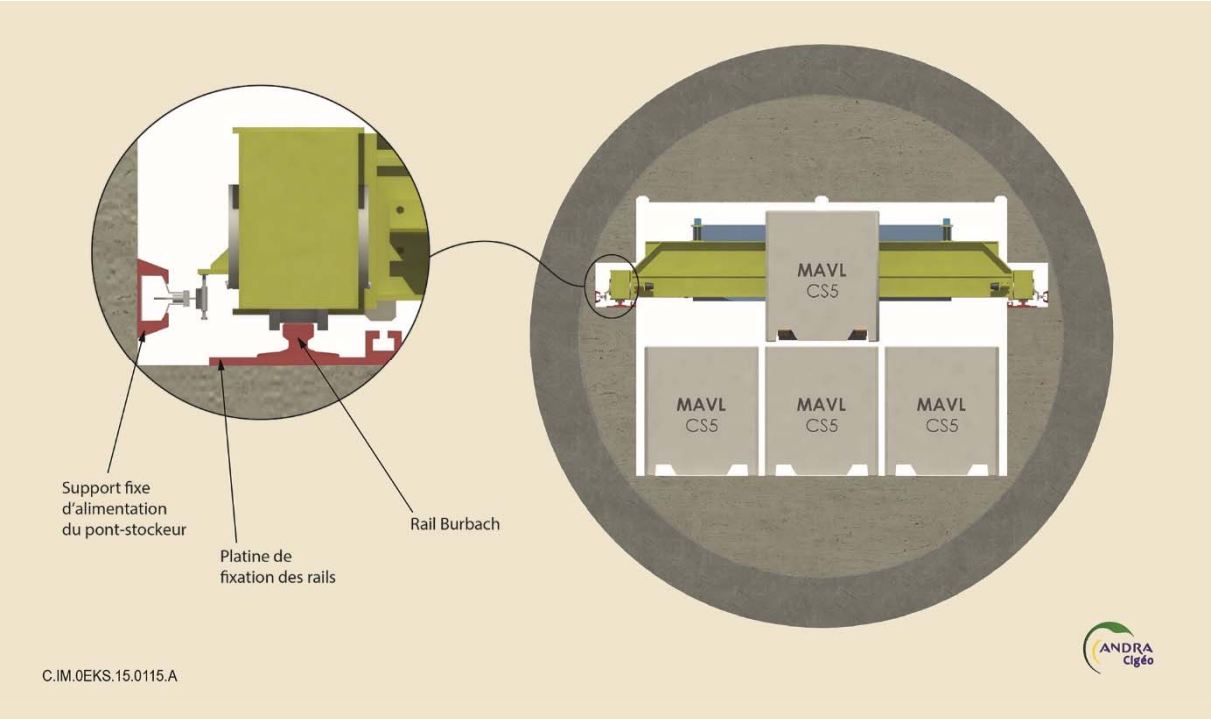


Figure 3-5 Détail des rails type Burbach laissés en alvéole de stockage (sur la base des études d'APS)

Un mur de radioprotection réalisé avec des blocs en béton est mis en place progressivement (au fur et à mesure du remplissage des couches de colis) à l'entrée de l'alvéole au moyen du pont stockeur pour limiter le débit de dose du côté de la cellule de manutention. Ces blocs massifs sont dimensionnés pour pouvoir être manutentionnés sur toute la durée d'exploitation de Cigéo. Ils sont retirés préalablement à une éventuelle opération de retrait.

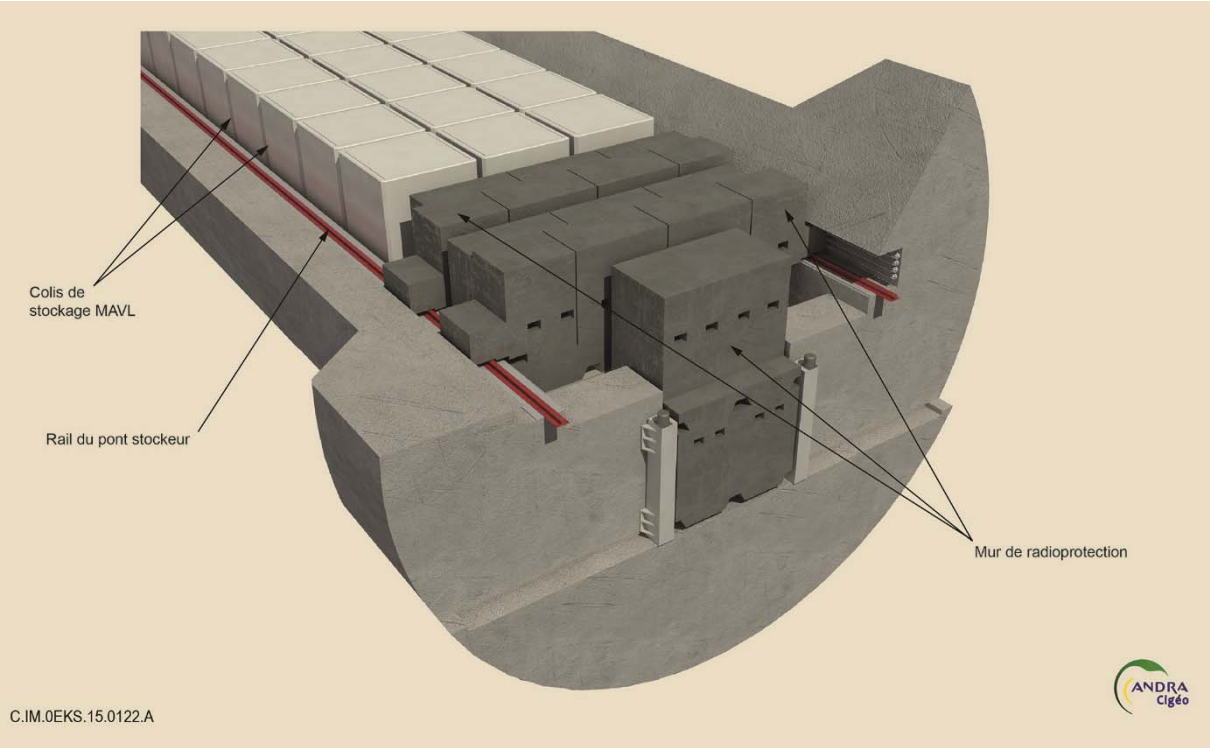


Figure 3-6 Vue du mur de radioprotection (sur la base des études d'APS)

Après remplissage de l'alvéole et mise en place du mur de radioprotection, les équipements servant à la mise en place des colis présents dans la cellule de manutention sont démontés (éventuellement pour réutilisation dans d'autres alvéoles) ou mis sous cocon (cf. § 2.3.4.3 du présent document). Leurs systèmes de fixation (platines solidaires du génie civil) sont laissés en place. Ceci permet de ne pas endommager le génie civil de l'ouvrage et la structure du sas de manutention. Les inserts métalliques, cadres, fourreaux et de façon générale toutes les pièces noyées dans le béton sont également laissées en place. Ils peuvent ainsi être réutilisés dans le cadre d'une éventuelle opération de retrait.

La zone d'accostage et la galerie seront traitées avec la même approche pour ce qui concerne le démontage et les équipements laissés en place.

3.3.5.2 Dans les alvéoles HA

Dans les alvéoles HA, les équipements laissés en place avec les colis sont, d'une part des intercalaires[19] en partie utile, d'autre part des équipements destinés à la radioprotection et à la fermeture de l'alvéole en tête d'alvéole.

<u>Intercalaires</u>

La fonction principale des intercalaires est d'éloigner physiquement les colis de stockage afin de répartir uniformément leur puissance thermique au sein de l'alvéole et de garantir le respect de leur critère de puissance linéique maximal. C'est pourquoi ces objets ne sont présents que dans les alvéoles HA1/HA2.

[19] La fonction des intercalaires est d'espacer les colis HA pour que les critères de température et les critères thermo hydro-mécaniques des argilites définis par l'Andra soient respectés.

Les intercalaires sont dimensionnés pour rester intègres et pour pouvoir être manutentionner durant toute la période d'exploitation.

Sur la base des études d'APS, un intercalaire pourrait être constitué des composants suivants :

- un couvercle et un fond soudés à une virole en acier non allié ;
- une tôle de fermeture en acier non allié ;
- des patins en céramique massive (zircone) identique à ceux des colis de stockage ;
- des clavettes de fixation des patins en céramique ;
- un matériau de remplissage, par exemple du sable sec.

Le diamètre externe de l'intercalaire est identique à celui des colis de stockage. La longueur de l'intercalaire varie en fonction de la famille de colis HA1/HA2 stockée.

Leur mise en place et leur retrait éventuel s'effectue avec les mêmes moyens que ceux qui seront utilisés pour les colis de stockage. C'est pourquoi, les intercalaires sont équipés des mêmes patins en céramique massive et de la même gorge de manutention que ceux qui équipent les colis de stockage.

Leur épaisseur d'acier est dimensionnée pour garantir leur intégrité pendant toute la période d'exploitation.

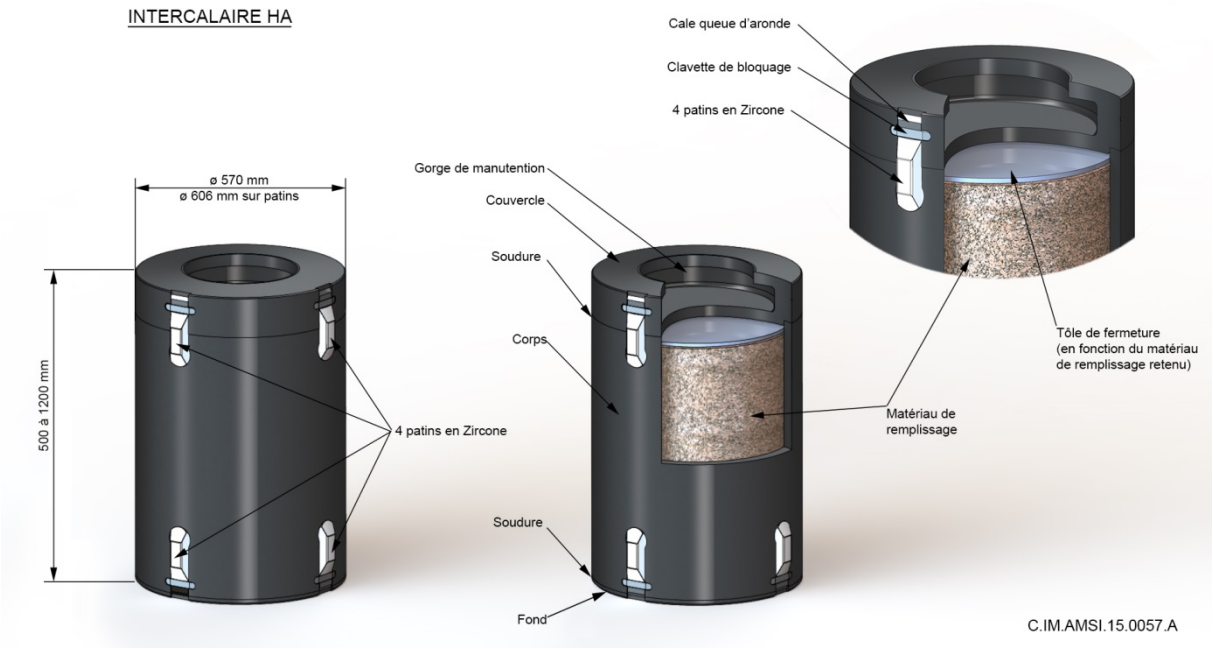


Figure 3-7 Vue des intercalaires pour les alvéoles HA (sur la base des études d'APS)

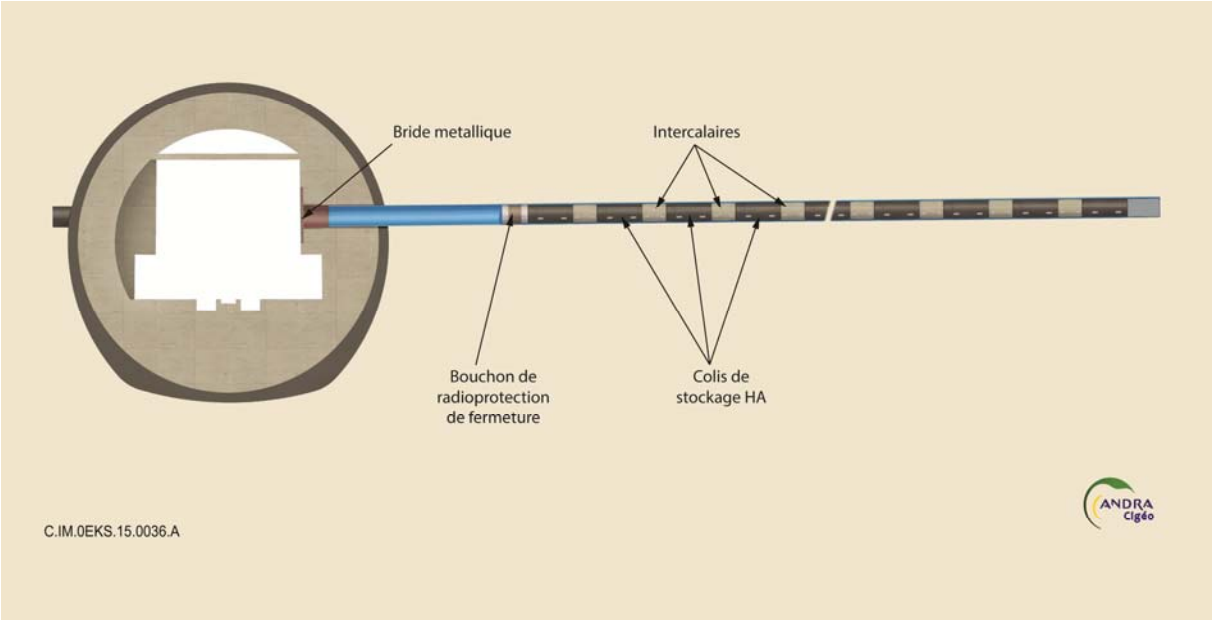


Figure 3-8 Vue d'un alvéole HA1/HA2 muni d'intercalaires (sur la base des études d'APS)

Les équipements laissés en tête d'alvéole après remplissage sont un bouchon de radioprotection de fermeture et un système de fermeture, positionnés l'un derrière l'autre.

Bouchon de radioprotection de fermeture

Le bouchon de radioprotection de fermeture limite le débit de dose dans la galerie. Il est réalisé en acier noir. Son diamètre est conçu pour disposer d'un jeu de manutention suffisant à la mise en place et lors d'un éventuel retrait. Sa mise en position est réalisée à l'aide du robot pousseur. Sa masse est de 900 kg environ. Il comporte :

- un point de préhension identique à celui des conteneurs de stockage HA ;
- 4 patins de glissement identiques à ceux des conteneurs de stockage HA ;
- un corps constitué d'une partie massive pour la protection radiologique contre les rayonnements γ.

Le bouchon de radioprotection est dimensionné pour pouvoir être manutentionné sur toute la durée d'exploitation de Cigéo. Il est retiré préalablement à une éventuelle opération de retrait.

Système de fermeture

Le système de fermeture a pour fonction de reprendre l'effort induit par le matériau d'obturation lors de la fermeture de l'alvéole et d'empêcher sa diffusion vers la partie utile. Il est mis en place à l'issue du chargement de l'alvéole.

Préalablement à une éventuelle opération de retrait, il est retiré par des opérations inverses de celles mises en œuvre à sa mise en place (dévissage et rétractation).

Des études seront menées en APD pour confirmer l'utilité et préciser la conception du système de fermeture et pour optimiser les opérations d'obturation de l'alvéole.

Pour mémoire, les premières opérations industrielles de fermeture d'alvéoles HA0 sont prévues vers 2070. Des essais de fermeture d'un démonstrateur d'alvéole HA sont prévus dès la phase industrielle pilote (5).

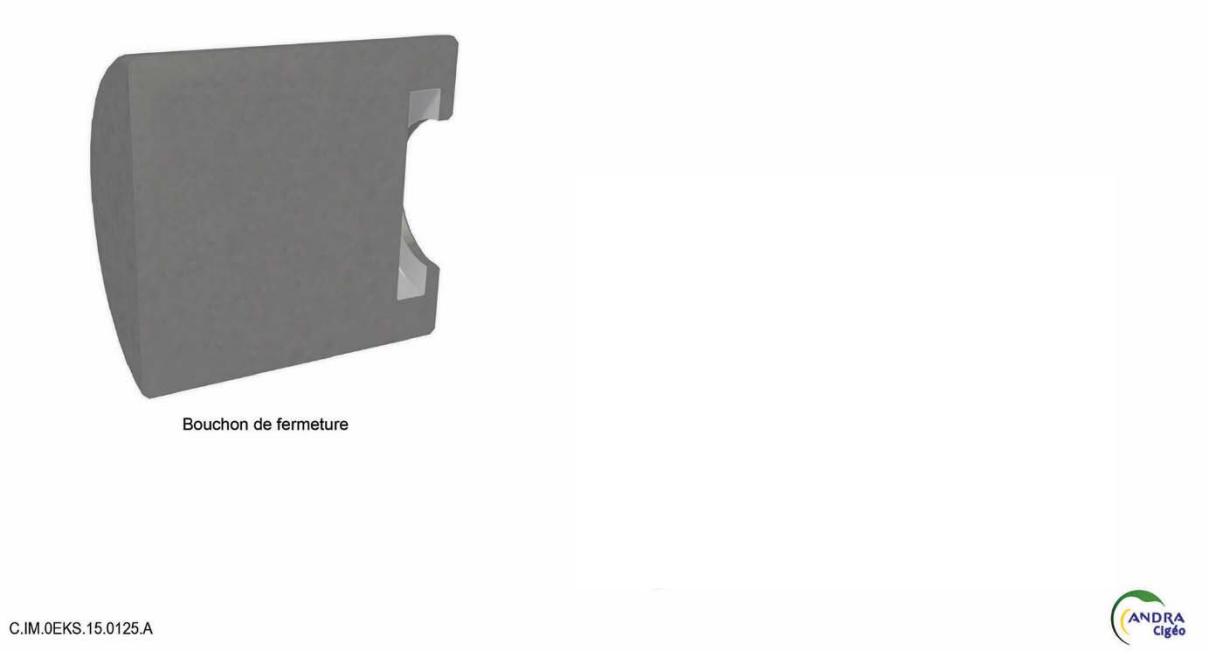


Figure 3-9 *Vue du bouchon de radioprotection et d'un système de fermeture envisagé pour les alvéoles HA ( ) (sur la base des études d'APS)*

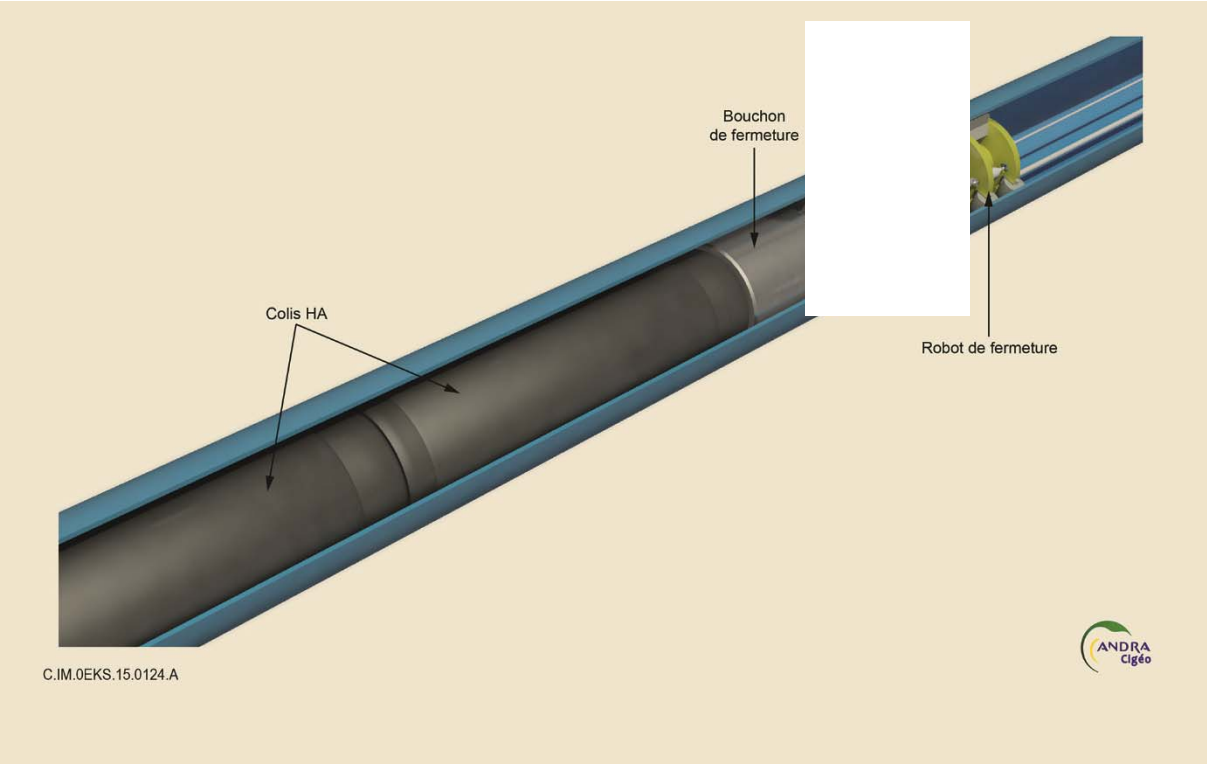


Figure 3-10 *Equipements laissés en place en tête d'un alvéole HA0 à l'issue de son remplissage (le robot de fermeture est retiré) (sur la base des études d'APS)*

La conception, le dimensionnement et les spécifications de réalisation des équipements qui sont laissés dans les alvéoles MA-VL et HA après leur remplissage (rails, blocs de radioprotection, intercalaires…) intègrent la récupérabilité. Ils doivent être suffisamment durables pour, soit être réutilisables lors d'une opération de retrait, soit pouvoir être retirer sans entraver les opérations de retrait des colis.

3.4 Surveillance

3.4.1 Définition

La « surveillance » d'une installation nucléaire de base (INB) consiste en la mesure systématique continue ou périodique d'un certain nombre de grandeurs permettant de contrôler le fonctionnement de l'installation. La surveillance commence dès la construction d'une INB et dure *a minima* pendant toute son exploitation. Dans une installation de stockage, la surveillance se poursuit après la fermeture définitive, sur une période donnée.

De façon générale, la surveillance d'une INB vise principalement à :

- vérifier que l'installation reste dans le domaine de fonctionnement tel que défini dans le rapport de sûreté et décliné dans les règles générales d'exploitation (RGE) ;
- identifier les dérives éventuelles de fonctionnement de l'installation, susceptibles d'amener l'installation hors de ce domaine en l'absence de mesures correctives, avant que l'installation ne sorte de son domaine de fonctionnement normal.

Pour Cigéo, la surveillance concerne en particulier l'installation souterraine et son environnement géologique en lien avec l'objectif de sûreté après fermeture du stockage. Elle aura pour objectif spécifique de s'assurer que l'état et le comportement des différents composants importants du système de stockage, définis pour garantir la sûreté après fermeture, sont dans un domaine conforme à l'accomplissement de leurs fonctions après fermeture. Elle aura également pour objectif de vérifier la capacité de retrait des colis stockés.

La surveillance a un caractère réglementaire. Elle vise la protection des intérêts visés mentionnés à l'article L.593-1 du Code de l'environnement (sécurité, santé et salubrité publiques, protection de la nature et de l'environnement).

Dans le cas de Cigéo, la surveillance a également pour objectif de vérifier la capacité de retrait des colis stockés.

Dans le présent DORec, ne sont abordées que les dispositions de surveillance spécifiquement dédiées à cette vérification de la capacité de retrait. Celles-ci sont mises en œuvre dans les alvéoles MA-VL et HA remplis et en attente de fermeture. En dehors de ces alvéoles, aucune disposition de surveillance spécifique à la vérification de la capacité de retrait des colis n'a été identifiée.

Les dispositions de surveillance spécifiques au retrait des colis sont déterminées en lien avec les facteurs susceptibles d'empêcher ou de compliquer significativement la manutention des colis. Elles sont essentielles pour évaluer les contraintes opérationnelles en préalable à une éventuelle opération de retrait.

Le programme de surveillance de Cigéo n'est pas encore fixé à ce stade. Une première proposition de programme sera présentée dans la DAC en 2018. Ce programme sera ensuite approfondi, notamment en termes de technologie de capteurs et de périodicité de suivi pour l'autorisation de mise en service de Cigéo prévu vers 2030. Ce programme comportera un volet spécifique lié à la vérification de la capacité de retrait des colis. Les essais menés dans ce cadre et le retour d'expérience acquis seront intégrés au bilan de la phase industrielle pilote. (5)

3.4.2 Alvéoles MA-VL

Dans les tunnels de stockage de déchets MA-VL, il apparaît à ce stade que la surveillance à mener en lien avec la récupérabilité pourrait porter par exemple sur les points suivants, et plus particulièrement sur l'évolution dans le temps de :

- la déformation de la voie de roulement du pont utilisé pour la mise en place des colis. Cette voie de roulement est réutilisée pour le retrait des colis ;
- les jeux fonctionnels entre les colis et les parois de l'alvéole et entre les colis entre eux. La surveillance de ces jeux fonctionnels permet de vérifier que la préhension du colis et leur transfert dans l'alvéole restent possibles.[20] Elle peut également fournir une indication sur une dégradation éventuelle des colis ou de l'alvéole ;
- l'alignement des piles de colis de stockage MA-VL. Elle permet de détecter de façon précoce des évolutions et des déformations qui perturbent l'agencement des colis dans l'alvéole. Elles peuvent être le signe d'une dégradation des colis ou de l'alvéole. Elles peuvent aussi traduire des dégradations des colis de stockage appuyés les uns sur les autres et entraîner une difficulté pour la préhension des colis (passage des fourches pour le levage).

Les paramètres à mesurer dans le cadre de cette surveillance n'ont pas encore été définis à ce stade.

La surveillance en lien avec la récupérabilité sera menée de manière périodique dans tous les alvéoles MA-VL en attente de fermeture (alvéole au niveau 2 de récupérabilité).

Après fermeture des alvéoles et du quartier, cette surveillance pourra se poursuivre dans les démonstrateurs d'alvéoles inactifs conçus pour être représentatifs des alvéoles MA-VL (5).[21]

En complément des mesures de surveillance des alvéoles, un programme de surveillance du conteneur de stockage MA-VL pourra être mis en œuvre pour vérifier le maintien de ses propriétés mécaniques dans les conditions d'environnement du stockage. Ce programme sera mené sur des colis de stockage inactifs stockés dans un démonstrateur inactif. Si l'effet de l'irradiation des déchets sur le comportement des conteneurs était considéré comme non négligeable, un programme de surveillance du comportement du béton pourra le cas échéant être envisagé sur des éprouvettes de béton disposées dans des alvéoles de surveillance actifs.[22]

3.4.3 Alvéoles HA

Dans les tunnels de stockage de déchets HA, il apparaît à ce stade que la surveillance à mener en lien avec la récupérabilité pourrait porter par exemple sur les points suivants :

- les jeux fonctionnels entre les conteneurs de stockage et le chemisage de l'alvéole et entre les intercalaires et le chemisage de l'alvéole, qui seront une indication des efforts mécaniques appliqués au chemisage ;
- le maintien de la géométrie de la tête d'alvéole permettant l'accostage de la hotte et le fonctionnement des systèmes de retrait et de mise en place des bouchons de radioprotection.

Les paramètres à mesurer dans le cadre de cette surveillance n'ont pas encore été définis à ce stade.

La surveillance en lien avec la récupérabilité sera menée de manière périodique dans certains alvéoles actifs dits « alvéoles de surveillance spécifique » ou « témoins » en attente de fermeture.

Une fois les alvéoles et le quartier HA0 fermés, cette surveillance pourra se poursuivre sur le démonstrateur d'alvéole inactif, conçu pour être représentatif des alvéoles HA (5).

---

[20] Avec des moyens analogues à ceux utilisés pour la mise en place.
[21] Deux démonstrateurs inactifs d'alvéoles MA-VL présentant des diamètres différents sont prévus.
[22] A partir d'un stock prédéterminé d'éprouvettes, une éprouvette serait prélevée de l'alvéole à intervalle périodique afin de surveiller les évolutions éventuelles du béton dans les conditions opérationnelles réelles du stockage.

En complément des mesures de surveillance des alvéoles, un programme de surveillance du conteneur de stockage HA pourra être mis en œuvre pour vérifier le maintien de ses propriétés, notamment de confinement dans les conditions d'environnement du stockage. Ce programme sera mené sur des conteneurs de stockage inactifs stockés dans un démonstrateur d'alvéole inactif. Si l'effet de l'irradiation des déchets sur le comportement des conteneurs était considéré comme non négligeable, un programme de surveillance du comportement de l'acier pourra être envisagé sur des éprouvettes d'acier disposées dans des alvéoles de surveillance actifs.

3.5 Équipements de retrait

3.5.1 Équipements de retrait des colis de stockage MA-VL

Cigéo est conçu pour que le retrait des colis de stockage de l'alvéole MA-VL et leur introduction dans la cellule de manutention soient réalisés avec des équipements identiques à ceux qui ont servi à leur mise en place.

Il s'agit principalement :

- du pont-stockeur ;
- de l'élévateur de mise à niveau de stockage ;
- de la table de réception colis.

Le processus de retrait se déroule en principe suivant les séquences automatiques de mise en stockage, mais en sens inverse.

Toutefois, des aménagements et/ou des adaptations de ces dispositifs mécaniques et des séquences automatiques sont envisageables afin d'adapter les opérations aux situations rencontrées. Par exemple, un contrôle de non-contamination par frotti peut être réalisé sur le colis de stockage à l'aide d'un bras robotisé, dès l'arrivée du colis de stockage dans le sas de manutention. S'il est contaminé, l'activité labile présente à sa surface peut être « fixée » sur le colis au moyen d'un équipement dédié (cf. § 4.3.1 du présent document). Cette opération est réalisée avant l'introduction du colis de stockage dans la hotte de transfert. L'objectif de cette éventuelle opération est de préserver la propreté radiologique des locaux amenés à recevoir le colis de stockage.

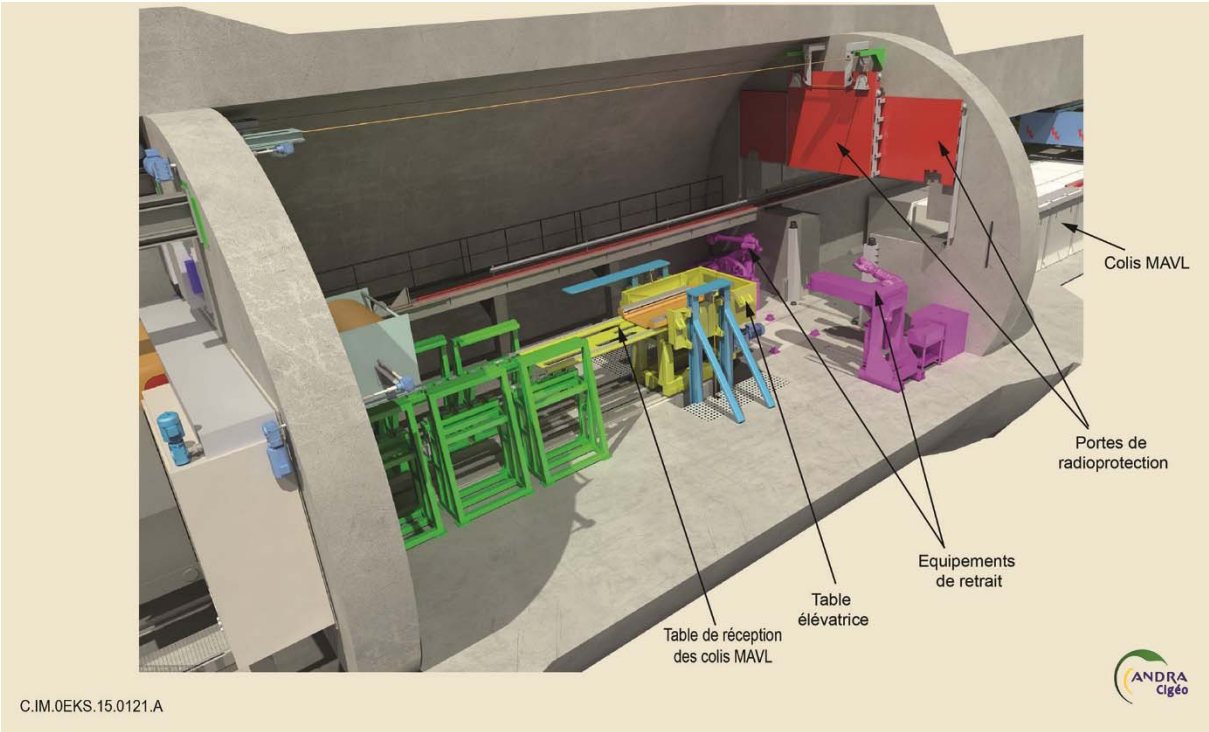


Figure 3-11 *Cellule de manutention MA-VL équipée des moyens de contrôle et de fixation de la contamination identifiés sous la légende « Equipements de retrait » dans cette illustration (sur la base des études d'APS)*

Par ailleurs, l'Andra développe un système de fourches orientables et télescopiques, adaptable sur le pont-stockeur pour prendre en charge des colis dans différentes positions (cf. Figure 3-12).

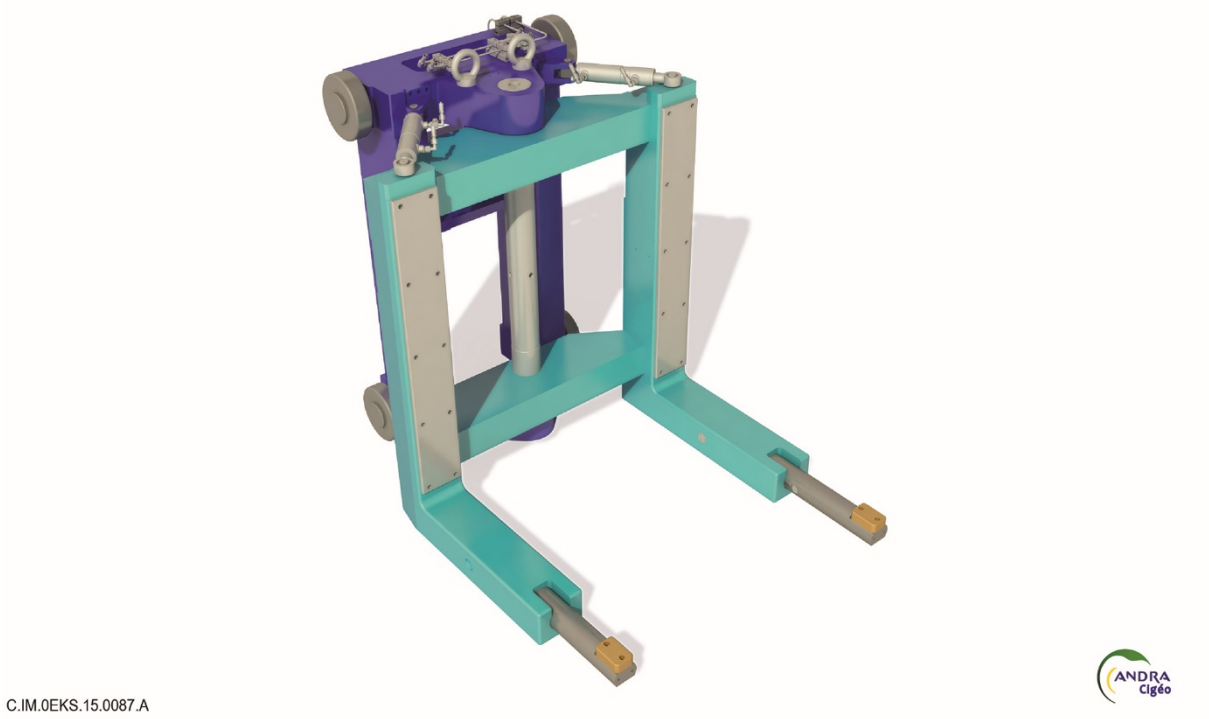


Figure 3-12 *Système à fourches télescopiques orientables (sur la base des études d'APS)*

La conception du pont-stockeur intègre dès son origine l'ensemble des interfaces nécessaires pour le montage éventuel du système de fourches orientables et télescopiques (cf. § 3.5.4 du présent document).

3.5.2 Équipements de retrait des colis de stockage HA

Le retrait des colis de stockage, des intercalaires et du bouchon de radioprotection de fermeture de l'alvéole HA est effectué par un robot-tracteur, différent du robot-pousseur utilisé pour la mise en place des colis.

Ce robot-tracteur est un robot automoteur qui progresse dans l'alvéole en tirant derrière lui un câble d'alimentation (ombilical d'alimentation) et un câble de halage. Arrivé au niveau du conteneur de stockage, il s'y accroche par son interface de manutention.[23] Puis l'ensemble « colis de stockage / robot-tracteur » est tiré jusqu'à la tête d'alvéole au moyen du câble de halage par un treuil situé sur la hotte.

Au stade actuel des études, le robot-tracteur est composé :

- d'un grappin de préhension pneumatique ;
- d'un corps portant un ensemble de « galets de roulement » et une motorisation connectée au treuil de halage ;
- d'un capteur de présence pour détecter le conteneur de stockage ou l'intercalaire ;
- d'un moyen manuel déporté d'ouverture du grappin en cas de blocage.

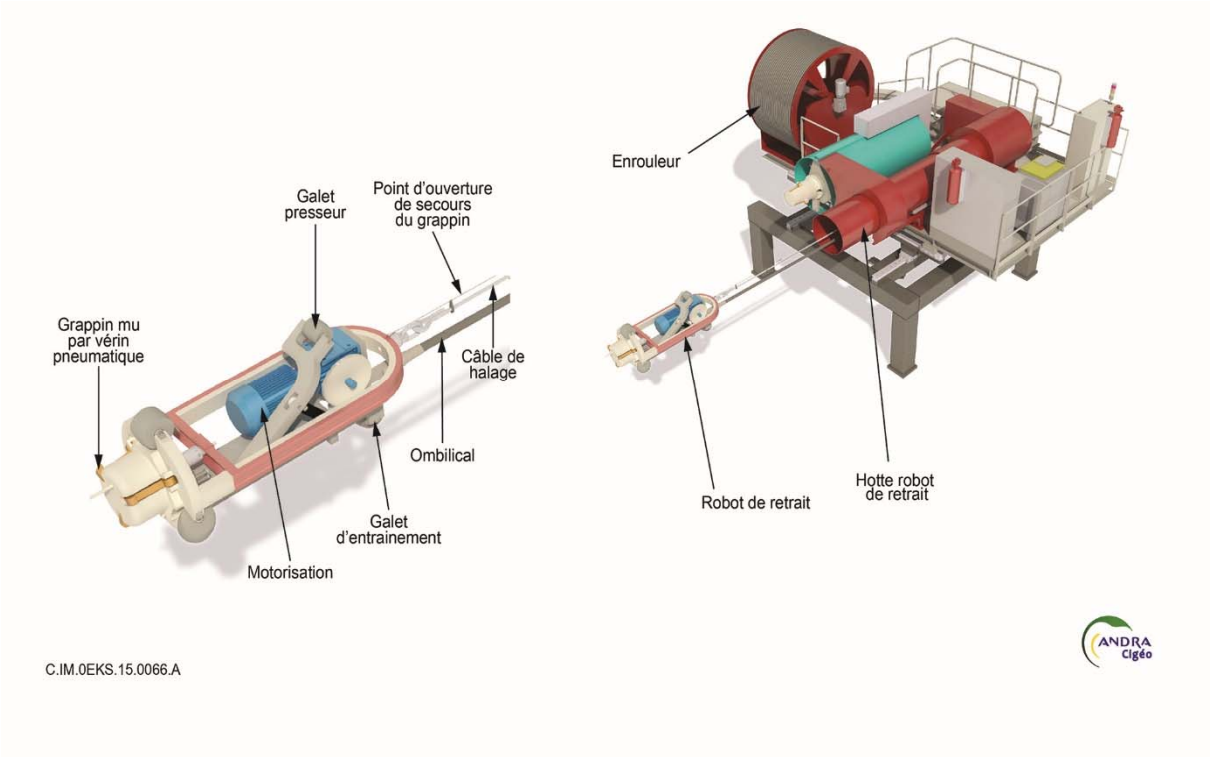


Figure 3-13 Hotte et robot tracteur (sur la base des études d'APS)

Le robot-tracteur est introduit au niveau de la tête d'alvéole par une « hotte robot-tracteur » utilisée pour le retrait. Celle-ci est munie des éléments nécessaires au fonctionnement du robot et au cycle de retrait. Cette hotte permet également de retirer temporairement le bouchon de radioprotection avant l'introduction du robot, puis de le remettre en place après récupération du robot. Une fois le colis de stockage tiré jusqu'à la tête d'alvéole, c'est la hotte de transfert des colis qui vient le récupérer et

[23] En APD, l'équipement du robot-tracteur par un retour vidéo, testé en essai (cf. § 3.5.3.2 du présent document), pour inspection visuelle de la gorge de préhension sera étudié.

l'évacuer selon une succession d'opérations inverse à celles du chargement. La hotte robot-tracteur est équipée des mêmes interfaces que l'ensemble des hottes, elle est manutentionnée par la navette HA.

Les conditions opérationnelles pour lesquelles le robot-tracteur est dimensionné prennent en compte l'évolution attendue de l'ambiance interne des alvéoles HA sur toute la durée d'exploitation de Cigéo (température, hygrométrie, corrosion surfacique des chemisages et des conteneurs). De plus, l'Andra étudie un robot complémentaire, dit « de brossage », pour le cas où les conditions d'environnement interne de l'alvéole seraient plus défavorables qu'attendues (accumulation de produits de corrosion). Il aura pour fonction de remettre le chemisage dans un état d'environnement compatible avec le domaine de fonctionnement du robot-tracteur et du dispositif de fermeture de l'alvéole (cf. § 3.5.3.2 du présent document).[24]

La hotte robot-tracteur et la hotte de transfert des colis sont dimensionnées pour les conditions opérationnelles des opérations de retrait, notamment la température des colis de stockage plus élevée que lors de la mise en stockage.

[24] Brossage et collecte des produits de corrosion.

3.5.3 Programme d'essais de retrait

3.5.3.1 Introduction

En parallèle des études de conception, l'Andra réalise depuis 2008 des essais technologiques de retrait de colis de stockage MA-VL et HA sur des bancs d'essais en surface. Leur finalité est de développer les équipements de retrait, d'identifier les situations préjudiciables à leur fonctionnement, et, s'il en existe, de mettre en œuvre des solutions de conception palliatives.

Ce travail est réalisé en surface, sur des prototypes industriels dans l'objectif de démontrer que la récupérabilité des colis de stockage est effectivement possible, dans des conditions d'environnement identifiées et caractérisées (état des conteneurs de stockage, état de l'alvéole) et pour des configurations mécaniques de mise en alvéole préétablies.

Les contraintes opérationnelles induites par le travail en milieu souterrain sont prises en compte pour la définition des prototypes. Toutefois, l'Andra a prévu des essais de retrait dans le Laboratoire souterrain sur des prototypes les plus proches possibles de la conception finale afin de tester le retrait en conditions souterraines.

Les essais menés en surface et au Laboratoire souterrain sont effectués sur des maquettes de colis inactives. Les premiers essais sur de vrais colis de stockage ne seront réalisés qu'au cours de la phase industrielle pilote, à l'horizon 2030, dans le cadre de l'autorisation de mise en service de Cigéo.

3.5.3.2 Essais de retrait de colis de stockage HA sur banc d'essais

En 2008-2009 l'Andra a développé dans le cadre du projet Européen ESDRED un premier prototype industriel pleine échelle de dispositif mécanique de mise en place de colis de stockage HA. Ce prototype, alimenté en air comprimé *via* un flexible monté sur enrouleur, dénommé « ombilical », assure de façon automatisée, en télé-opération, l'introduction, puis la progression du colis de stockage dans un chemisage horizontal représentatif d'un alvéole HA.

Les essais, conduits sur banc d'essais en surface, ont permis de démontrer la capacité du système à introduire et à retirer de façon satisfaisante, sur une longueur de 100 m, une maquette de colis de stockage HA.

A la fin de la campagne nominale d'essais[25], une seconde campagne a été engagée pour juger de la robustesse du système. Il s'agissait d'évaluer sa capacité à mettre en place et à retirer les colis de stockage HA dans un alvéole fortement déformé. Pour ce faire, une maquette d'alvéole de 100 m a été créée avec les caractéristiques suivantes :

- un axe de chemisage non rectiligne, simulé par une forme sinusoïde majorant les défauts de rectitude de l'alvéole lors de son creusement ;
- la création d'une « marche » centimétrique entre deux tronçons de chemisage, simulant un déboîtement des éléments tubulaires constitutifs du chemisage.

[25] Vérification du bon fonctionnement et des performances du robot, du système d'accostage de la hotte de transfert, des portes de radioprotection, tests des différents systèmes de dépannage.

Dans ces conditions de déformation extrêmes (qui n'ont jamais été rencontrées lors du creusement et du tubage à l'avancement des alvéoles réalisés à ce jour dans le Laboratoire souterrain), le robot et son colis de stockage ont néanmoins franchi les obstacles créés, autorisant aussi bien la mise en alvéole que le retrait. La Figure 3-14 présente la configuration des essais de retrait correspondants.

Figure 3-14 Test de récupérabilité sur 100m d'un conteneur HA dans un alvéole fortement déformé à l'aide du « robot pousseur ESDRED »

Ces essais ont permis de vérifier que les concepts d'alvéole et de colis de stockage HA se prêtaient bien aux éventuelles opérations de retrait.

Mi-2014, une nouvelle campagne d'essais de récupérabilité des colis de stockage HA a été engagée sur un nouveau banc d'essais en surface, afin de vérifier que les opérations de retrait ne sont pas empêchées par des conditions d'environnement de même nature que celles susceptibles d'être rencontrées dans un alvéole HA. L'objectif était de simuler des conditions d'environnement pénalisantes.

Le banc d'essais constitué pour tester cette configuration de retrait comprend :

- une maquette de colis de stockage HA ;
- un tubage simulant un alvéole équipé d'un système de chauffe permettant d'assurer le maintien en température ;
- un dispositif d'arrosage par un brouillard salin permettant de générer un « enrouillement » accéléré du tubage et du conteneur de stockage, complété par un ruissellement d'eau en génératrice inférieure permettant de générer une hygrométrie élevée dans le tubage (atmosphère saturée) ;
- un dispositif d'accostage à la tête d'alvéole muni d'un enrouleur et d'un treuil de traction pour le retrait du colis de stockage (ces 2 derniers dispositifs sont reliés au robot-tracteur) ;

- un robot-tracteur télé-opéré, motorisé électriquement *via* l'ombilical pour sa progression autonome jusqu'au contact du colis de stockage.

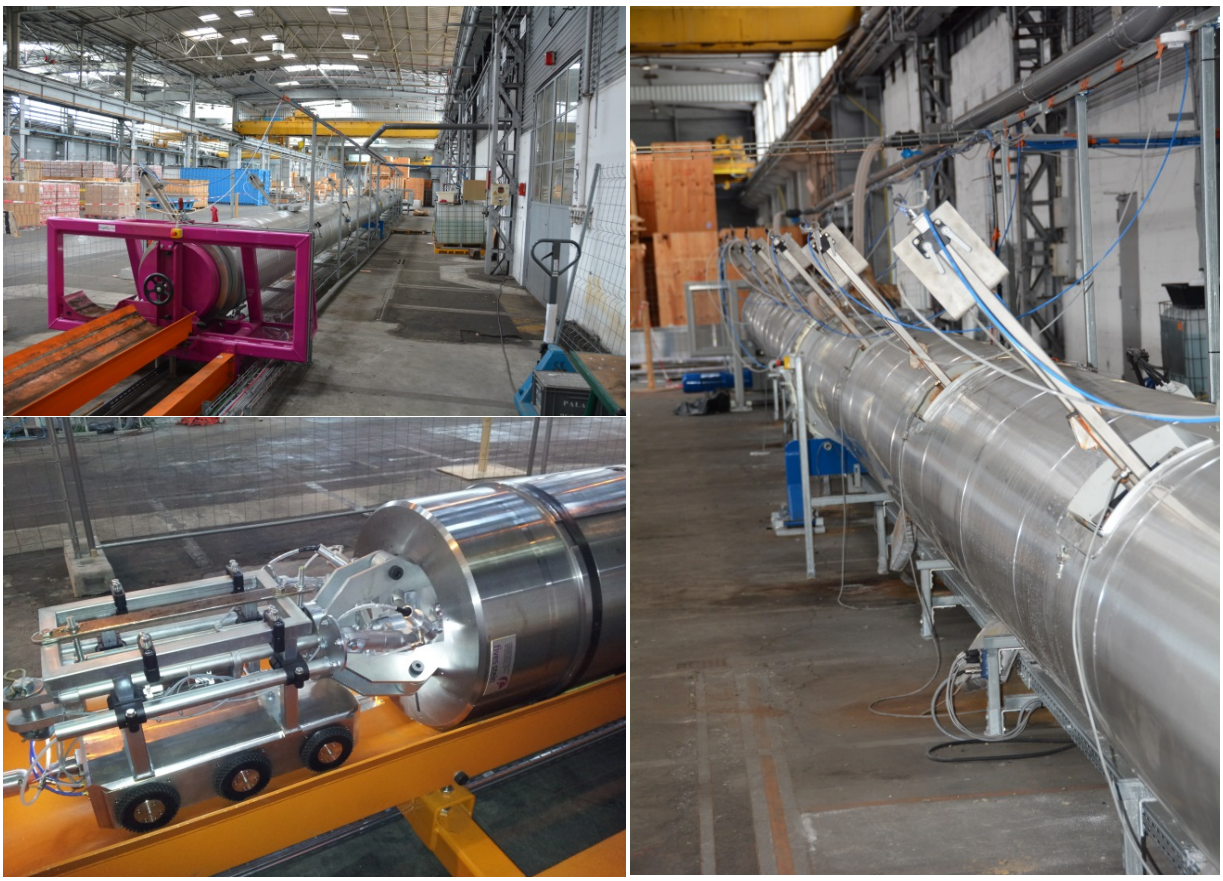


Figure 3-15 Banc d'essais de récupérabilité de niveau II des conteneurs HA (température, humidité)

Les essais réalisés ont démontré :

- la capacité du robot à progresser jusqu'au colis de stockage HA dans une atmosphère de vapeur saturée, à 90° C de température, sur une piste de roulement (intrados du chemisage) rouillée et partiellement recouverte d'eau de suintement ;
- la capacité du robot à accrocher le conteneur de stockage HA rouillé par sa gorge de préhension et à le tracter vers l'extérieur de l'alvéole ;
- la capacité du dispositif de patins en céramique équipant le conteneur à résister à l'oxydation et à prévenir le collage par corrosion du corps du conteneur de stockage à la paroi interne du chemisage ;
- la capacité de l'ensemble « robot / conteneur » à être tiré jusqu'à l'entrée du tubage, malgré l'accumulation de produits oxydés (rouille) dans l'alvéole et au niveau des cadres de porte.

Il faut souligner que la méthode utilisée pour générer la corrosion des conteneurs et du chemisage (brouillard salin) entraîne des conditions physico-chimiques *a priori* plus sévères que celles qui seront rencontrées dans le stockage sur toute la durée d'exploitation séculaire de Cigéo.

Figure 3-16 Récupération de la maquette de colis de stockage et accumulation de rouille en tête d'alvéole

Les essais ont permis d'identifier un risque de blocage des dispositifs de fermeture de l'alvéole et de la hotte en cas d'accumulation trop importante de rouille, poussée en tête d'alvéole par le conteneur lors du retrait. Le robot dit « de brossage » qui est étudié par l'Andra (cf. § 3.5.2 du présent document) permettra d'évacuer la rouille. Le test de ce dispositif complémentaire est prévu en 2016 en atelier de surface.

Les essais menés sur banc d'essais ont permis de valider la possibilité du retrait d'un colis de stockage HA, y compris dans des conditions plus difficiles que celles attendues en conditions opérationnelles réelles (déformation, corrosion, hygrométrie…).

Ces essais seront complétés par un programme spécifique au Laboratoire souterrain, sur des prototypes de taille réelle, les plus proches possibles de la conception finale, afin de tester le retrait en conditions souterraines. Ces essais participeront au développement et à la qualification des équipements de retrait en préalable aux essais menés en phase industrielle pilote.

3.5.4 Essais de retrait de colis de stockage MA-VL sur banc d'essais

Un programme d'essais de retrait de colis de stockage MA-VL a été mené depuis 2013 sur un banc d'essai en surface à l'échelle 1. Le retrait unitaire d'un colis de stockage est réalisé par un moyen spécifique de récupération à fourches télescopiques et orientables installé sur un chariot. Le chariot a été retenu afin de faciliter la réalisation de l'essai. Même si dans Cigéo, c'est un pont-stockeur qui sera utilisé, cet équipement permet de tester la capacité du système de fourches à s'adapter à différentes situations de retrait et d'obtenir des résultats représentatifs des conditions réelles. Le système de fourches testé est directement intégrable sur le pont de manutention.

Figure 3-17 Chariot utilisé pour les essais de retrait de maquettes de colis de stockage MA-VL

Les essais menés ont pour but de tester la capacité à reprendre des colis de stockage, y compris en cas de déplacement hors de sa position nominale. Un tel déplacement constitue une situation pénalisante pour le retrait.

Les positions des colis de stockage sont établies à partir des configurations géométriquement possibles dans un alvéole plein, compte tenu des jeux présents. Toutefois, elles n'ont pas vocation à être représentatives d'éventuelles évolutions de ces positions pendant la durée d'exploitation du stockage (en fonctionnement normal, les empilements de colis de stockage sont stables pendant toute la durée d'exploitation de Cigéo).

L'étude des configurations de retrait a mis en avant diverses configurations de colis à prendre en compte pour l'étude du moyen de manutention à fourches. Des cas de déplacement latéraux ou de désaxage des colis ont été étudiés comme illustré sur la Figure 3-18 et la Figure 3-19.

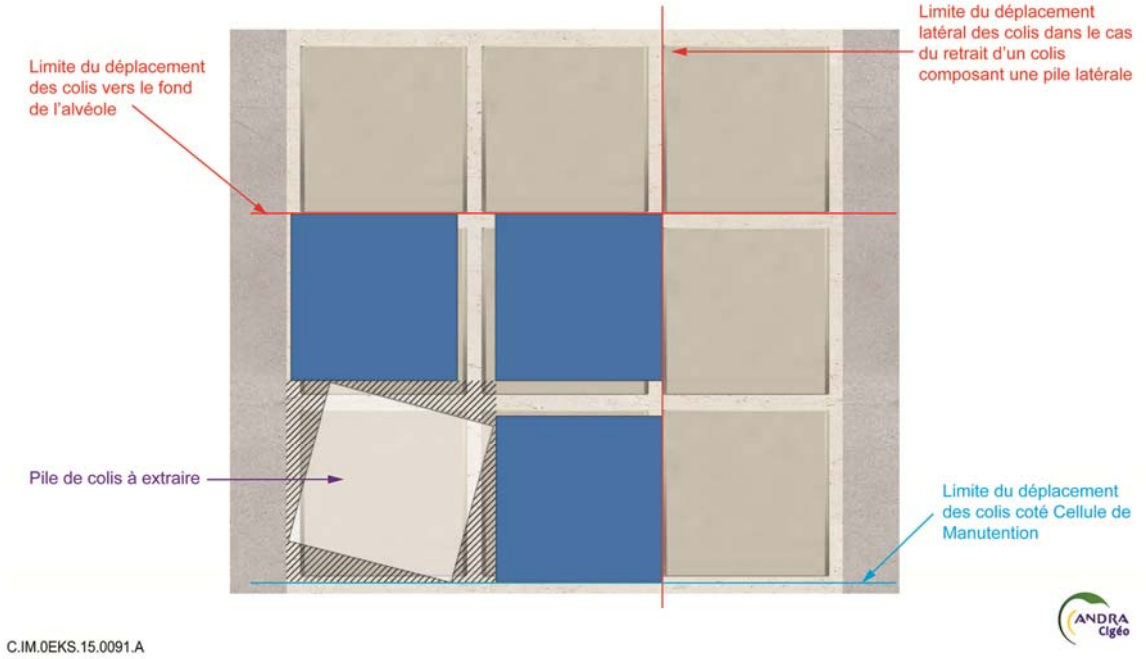


Figure 3-18 Déplacement possible des colis en position latérale (vue de dessus)

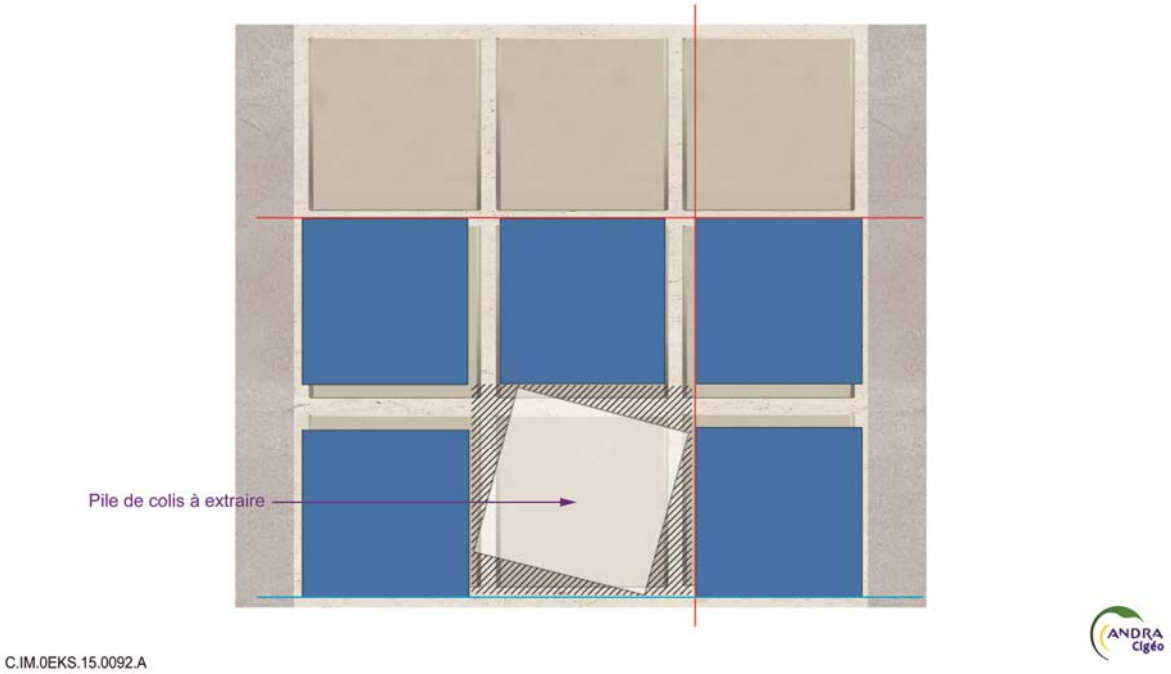


Figure 3-19 Déplacement possible des colis en position centrale (vue de dessus)

Les essais ont permis de soulever et de retirer les colis dans les positions suivantes :

- piles déplacées latéralement dans l'alvéole ;
- colis en contact, soit avec la paroi, soit avec un colis de la pile centrale ;
- rotations sens horaire et antihoraire du colis de 11°;
- décalage d'un colis de 300 mm par rapport au colis inférieur.

Les essais ont permis de vérifier l'importance du système de détection du positionnement du conteneur pour permettre l'introduction des fourches du chariot de retrait. Ce positionnement est assuré par la visée combinée de capteurs de distance positionnés sur le tablier porte fourches. Une fois la position des passages des fourches du conteneur identifiée, le processus d'introduction peut commencer avec un contrôle continu de la position des fourches parallèles par rapport aux passages de fourches du colis.

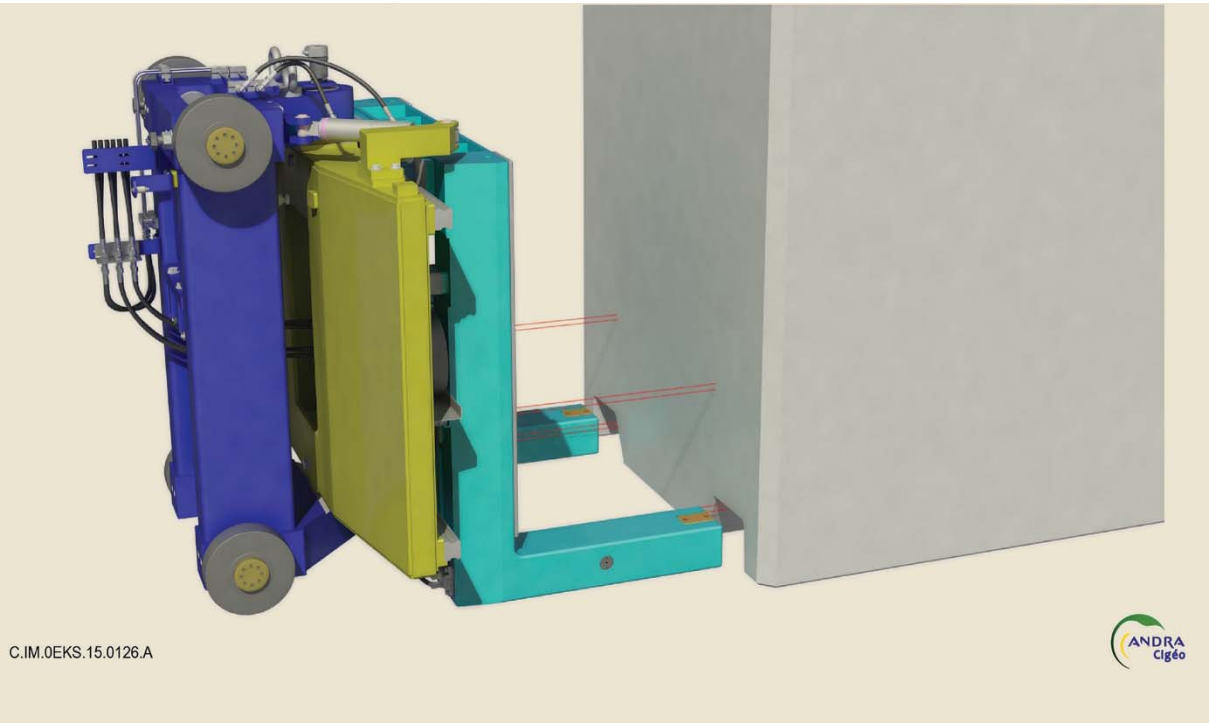


Figure 3-20 Configuration pour la mesure d'orientation du colis (sur la base des études d'APS)

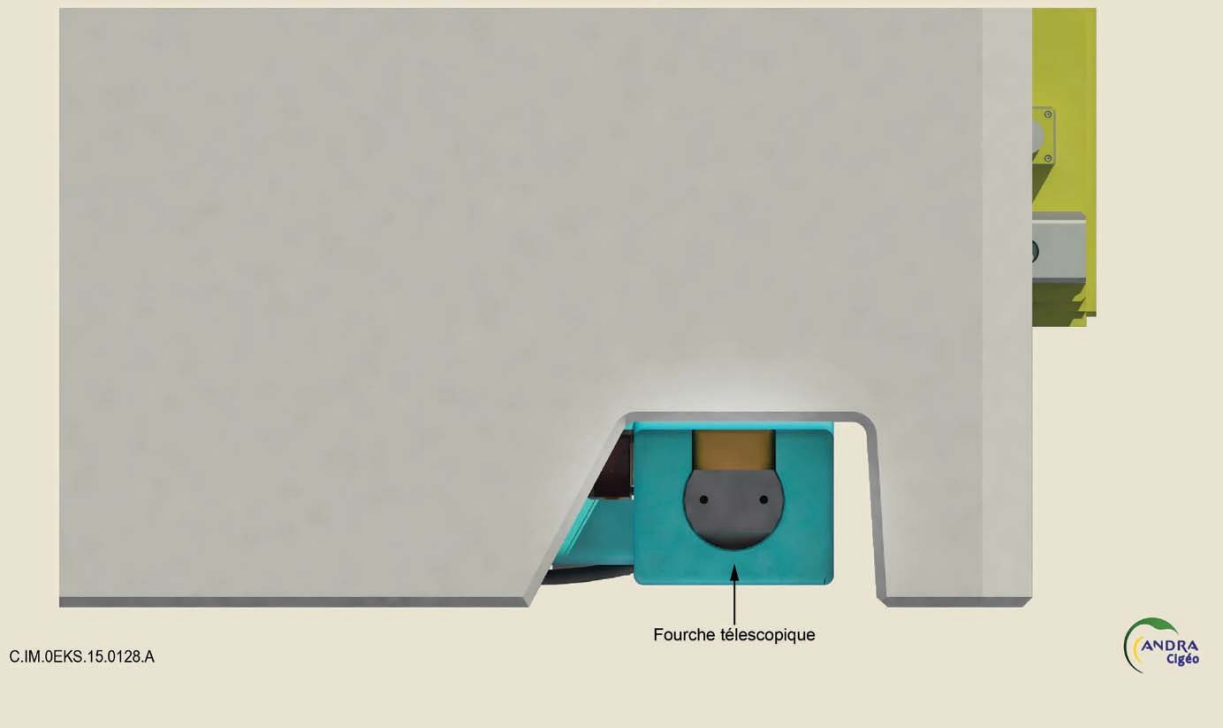


Figure 3-21 Fourche au sein de son logement dans le colis (sur la base des études d'APS)

D'un point de vue mécanique, les essais menés sur banc d'essais ont permis de valider la possibilité du retrait de colis de stockage MA-VL dans des conditions opératoires reproduisant les conditions opérationnelles (échelle 1) et dans des situations couvrant les configurations géométriquement possibles compte tenu de la géométrie des colis de stockage et de l'alvéole MA-VL et des jeux disponibles (cf. § 3.3.4.2 du présent document).

3.6 Aptitude à la déconstruction et à la remise en service des ouvrages de fermeture d'alvéole et de galerie de Cigéo

3.6.1 Introduction

Conformément à la proposition de PDE (5), les premières opérations de fermeture d'alvéoles et de galeries du quartier HA0 débutent à l'horizon 2070 et les premières opérations de fermeture d'alvéoles et de galeries du quartier MA-VL débutent à l'horizon 2100.

La mise en œuvre de ces opérations de fermeture nécessitera une autorisation spécifique délivrée dans un cadre réglementaire à définir. Il en va de même pour les éventuelles opérations de déconstruction et de réouverture de quartiers et d'alvéoles fermés. C'est à cette échéance que l'ensemble des évaluations de sûreté associées seront menées et formalisées.

Les opérations de fermeture rendent plus complexes d'éventuelles opérations de retrait des colis, en raison principalement des perturbations que les opérations de déconstruction des ouvrages de fermeture entraînent sur l'exploitation (création de chantier locaux, évacuation de déblais, coactivité…). Toutefois, le retrait des colis doit rester possible jusqu'à la fermeture définitive de Cigéo.

Les études préliminaires relatives à l'aptitude à la déconstruction des ouvrages de fermeture d'alvéole et de galerie, menées par l'Andra sur la base des options techniques retenues à ce stade pour ces ouvrages, font l'objet du présent chapitre. Ces études seront approfondies, d'ici la DAC et au-delà, en particulier pour suivre d'éventuelles évolutions des options de conception des ouvrages de fermeture. L'objectif est de disposer de solutions techniques présentant un degré de maturité technique suffisant pour les demandes d'autorisation spécifiques de réalisation de ces ouvrages. Le programme d'essais associé sera décrit plus précisément dans le cadre de la DAC de Cigéo.

Dans le cas où le retrait de colis de stockage serait décidé après la fermeture d'alvéoles et de quartiers, les premières opérations à réaliser seraient de déconstruire les ouvrages de fermeture partielle réalisés afin de rééquiper les galeries et les alvéoles pour le retrait.[26]

Des analyses de risques spécifiques seraient menées pour l'autorisation de mise en œuvre des opérations de déconstruction et de retrait.

Les ouvrages à déconstruire seraient des scellements de galeries, des remblais de galeries et des ouvrages de fermeture d'alvéoles.

L'ensemble des parties rouvertes devront être rééquipées, puis remises en service. Dans ce cas, il s'agit d'une remise en service temporaire, les parties rouvertes n'ayant plus vocation à être réutilisées pour le stockage. Par rapport à la mise en place, des équipements et des ouvrages temporaires pourraient être utilisés (soutènements, réaménagements, ventilation de chantier...), dans le respect des exigences de sûreté.

A l'approche de la partie utile de l'alvéole, des moyens spécifiques d'investigation et de reconnaissance des alvéoles seront mis en œuvre pour caractériser l'état des ouvrages et des colis de stockage. Cette caractérisation est nécessaire pour valider les hypothèses retenues notamment pour l'évaluation de sûreté des opérations de retrait (vérification de l'absence de contamination, vérification de l'état des colis…). Le rétablissement de la ventilation nucléaire sera programmé.

La fermeture des alvéoles et des galeries HA1/HA2 étant prévue à l'horizon 2145, préalablement à la fermeture définitive de Cigéo prévue à l'horizon 2150, l'étude de la réouverture de la zone HA1/HA2 n'est pas poursuivie dans le présent DORec. En effet, il est difficilement envisageable qu'après plus de 100 ans de retour d'exploitation de Cigéo, la fermeture des quartiers HA1/HA2 soit entreprise en 2145 pour que ceux-ci soient rouverts avant 2150. Toutefois, on peut indiquer qu'outre la prise en compte des aspects thermiques spécifiques à ces quartiers, les opérations à mener pour leur réouverture ne seraient pas *a priori* de nature différente de celle à mener pour le quartier HA0.

[26] Des solutions techniques alternatives, non présentées dans le présent DORec, pourraient le moment venu être envisagées, notamment le creusement de galeries contournant les scellements.

3.6.2 Réouverture des galeries

La réouverture des galeries de liaison débute avec la déconstruction des différents scellements des galeries de liaison. La localisation des scellements de galeries envisagés à ce stade est présentée sur la Figure 3-22. La localisation de ces scellements, ainsi que les options de conception et les solutions techniques retenues pour assurer le niveau de performance requis seront précisés en APD.

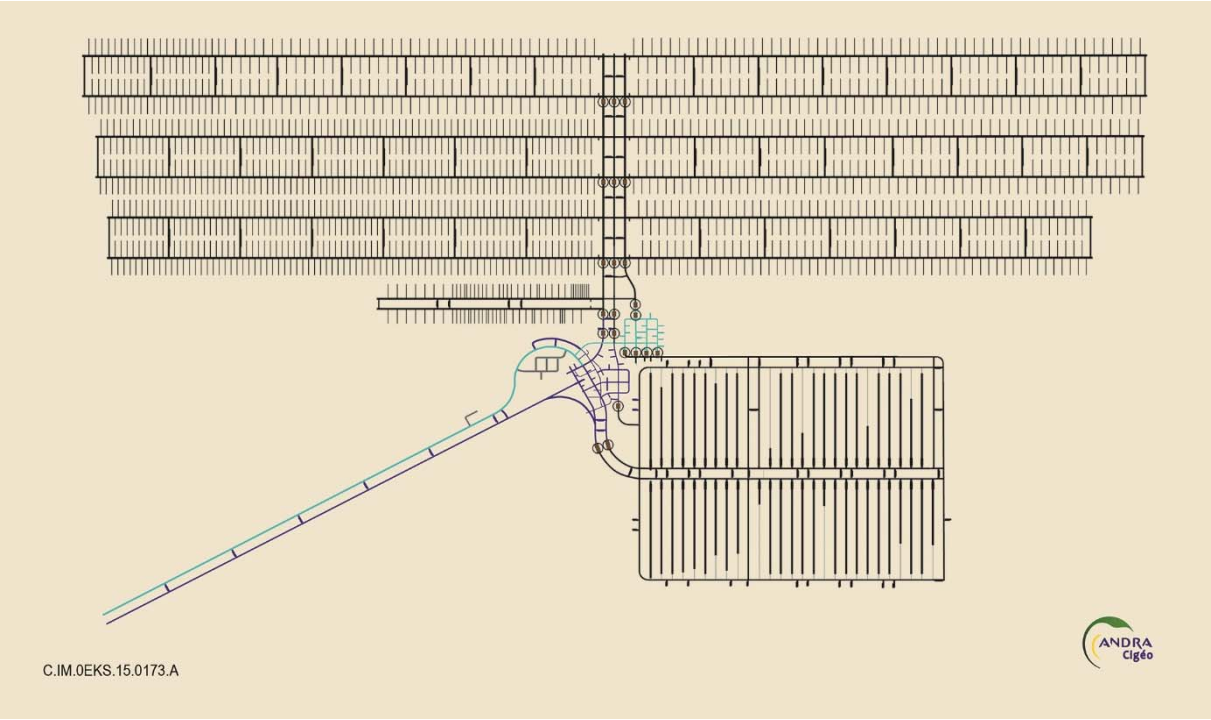


Figure 3-22 Localisation des scellements de galerie - représentés par des cercles (sur la base des études d'APS)

Les scellements des galeries sont, au stade actuel de la conception, composés de deux massifs d'appui en béton de plusieurs mètres d'épaisseur encadrant un noyau d'argile. Le long de ce noyau argileux, le revêtement de la galerie est déposé sur plusieurs tronçons de 1 m de longueur afin de permettre le contact direct entre l'argile et les argilites du Callovo-Oxfordien. Le radier aura été retiré au préalable.

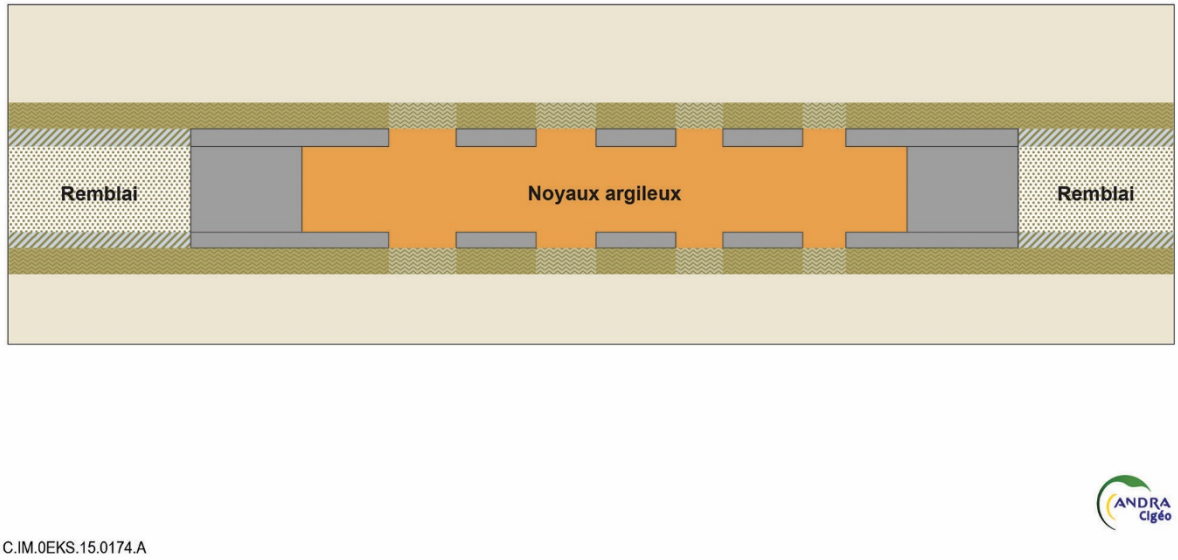


Figure 3-23 Structure d'un scellement dans une galerie (sur la base des études d'APS)

Pour la déconstruction des massifs d'appui, il est actuellement envisagé de scier longitudinalement des blocs par tronçon de 50 cm à 80 cm et de les évacuer. Ces travaux de démolition, et la poussière qui en résultera, nécessitent la mise en place d'un système d'aspiration à la source.

Deux solutions sont envisageables au niveau du soutènement :

- aléser la galerie au droit des massifs et disposer un nouveau soutènement à l'avancement en béton projeté et boulons ;
- effectuer un pré-découpage périmétral du massif d'appui permettant de garantir l'intégrité du revêtement laissé en place.

Le retrait du noyau d'argile est envisagé à la pelle mécanique. Pour son évacuation, la pelle mécanique pourra charger des camions (« dumpers ») les uns après les autres. Des chargeurs-transporteurs pourront également être utilisés. Au droit des déposes du revêtement, la roche sera purgée en paroi et le soutènement repris localement, par exemple par mise en place d'un complément de soutènement par boulonnage et béton projeté. Après reconstruction du revêtement au niveau des zones de scellement, le radier en béton armé et le passage des réseaux sont reconstitués.

Le remblai des galeries sera, comme pour le noyau argileux, déblayé à la pelle mécanique et dirigé vers une bande transporteuse pour évacuation.

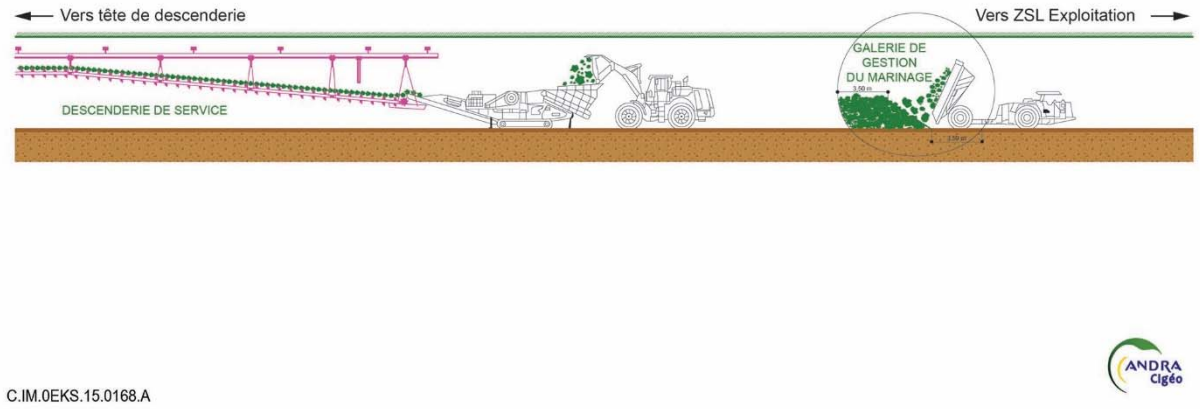


Figure 3-24 Schématisation du système de marinage combiné à une bande transporteuse (sur la base des études d'APS)

Suite à la réouverture des galeries, les dispositifs de ventilation ainsi que tous les équipements nécessaires à la reconnexion au système d'exploitation seront mis en place, notamment les rails et les équipements de manutention. Les galeries de recoupe et les galeries techniques seront également rééquipées de façon à pouvoir assurer des fonctions équivalentes à celles de la mise en stockage. Des dispositions de sûreté et de surveillance radiologique seront notamment reconduites.

Les études préliminaires montrent la capacité à déconstruire les ouvrages de fermeture des galeries, sous réserve de précautions opérationnelles spécifiques, en particulier concernant la ventilation des chantiers et la reconstitution des soutènements.

3.6.3 Réouverture des alvéoles MA-VL

3.6.3.1 Côté tête d'alvéole

Dans le cas où un scellement a été mis en place en tête d'alvéole, sa déconstruction pourra être envisagée selon une méthodologie similaire à celle des scellements de galerie.

La méthode de retrait des noyaux de scellement des galeries est également applicable pour le déblaiement de matériaux qui auraient été utilisés pour remblayer la tête d'alvéole MA-VL ou pour constituer le noyau d'un éventuel scellement. Des précautions complémentaires pourront être prises (par exemple des forages de reconnaissance) en raison de la proximité plus grande de la partie utile de l'alvéole contenant les colis.

La reconstitution du radier en béton armé (coffrage, ferraillage, bétonnage, passage des réseaux) et du revêtement au droit des tronçons déposés est nécessaire au rééquipement de la tête d'alvéole. Ces travaux sont réalisables avec une ventilation secondaire de type « travaux ».

Préalablement à la déconstruction du mur d'obturation en béton séparant la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole, il est envisagé qu'une ventilation provisoire de type « chantier de démantèlement » soit mise en œuvre entre la cellule de manutention et la galerie afin d'isoler la zone en travaux. Cette disposition permet de faire face à une éventuelle contamination à l'intérieur de l'alvéole lors de sa réouverture.

La déconstruction de ce mur d'obturation est réalisée par une méthode douce, par exemple un carottage et sciage sous boue pour éviter la formation de point chaud et d'étincelles.

La finalisation du démontage de ce mur et la reprise de la ventilation de l'alvéole est une opération qui nécessite un phasage particulier. En effet, pendant la période de fermeture de l'alvéole et du fait de l'absence de ventilation, des gaz radioactifs et des gaz de radiolyse, en particulier l'H_2 dans certains alvéoles contenant des déchets organiques,[27] ont pu s'accumuler. Pour se prémunir de tout risque d'explosion lors de la réouverture, il convient de pouvoir disposer de :

- de mesures de la concentration en gaz de radiolyse ;
- de la possibilité d'évacuer les gaz de l'alvéole.

L'Andra envisage donc que les murs d'obturation de certains alvéoles MA-VL soient équipés d'un dispositif fixe laissé en attente d'une éventuelle réouverture, facilitant ce type d'investigations préalables.

[27] La majorité des colis stockés ne produisent pas ou produisent des quantités négligeables d'hydrogène de radiolyse. Par ailleurs, les spécifications d'acceptation de Cigéo limiteront les quantités d'hydrogène produites par les colis contenant des substances organiques.

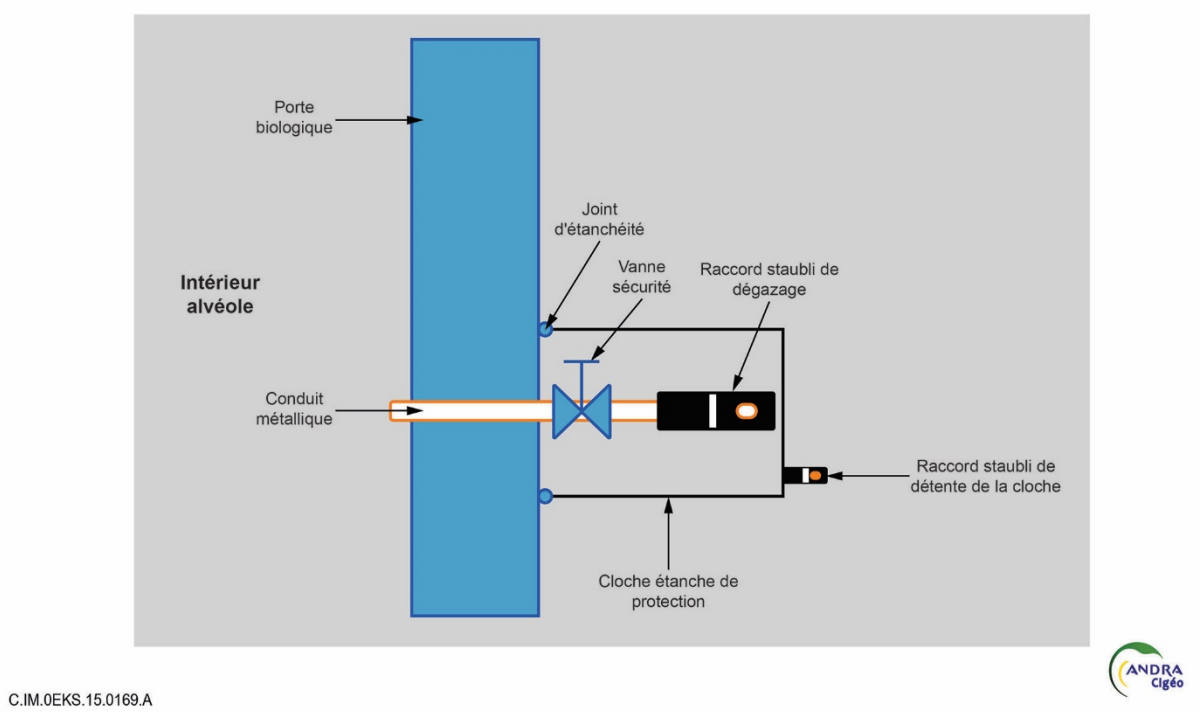


Figure 3-25 Principe de dispositif de contrôle de l'atmosphère en alvéole MA-VL (sur la base des études d'APS)

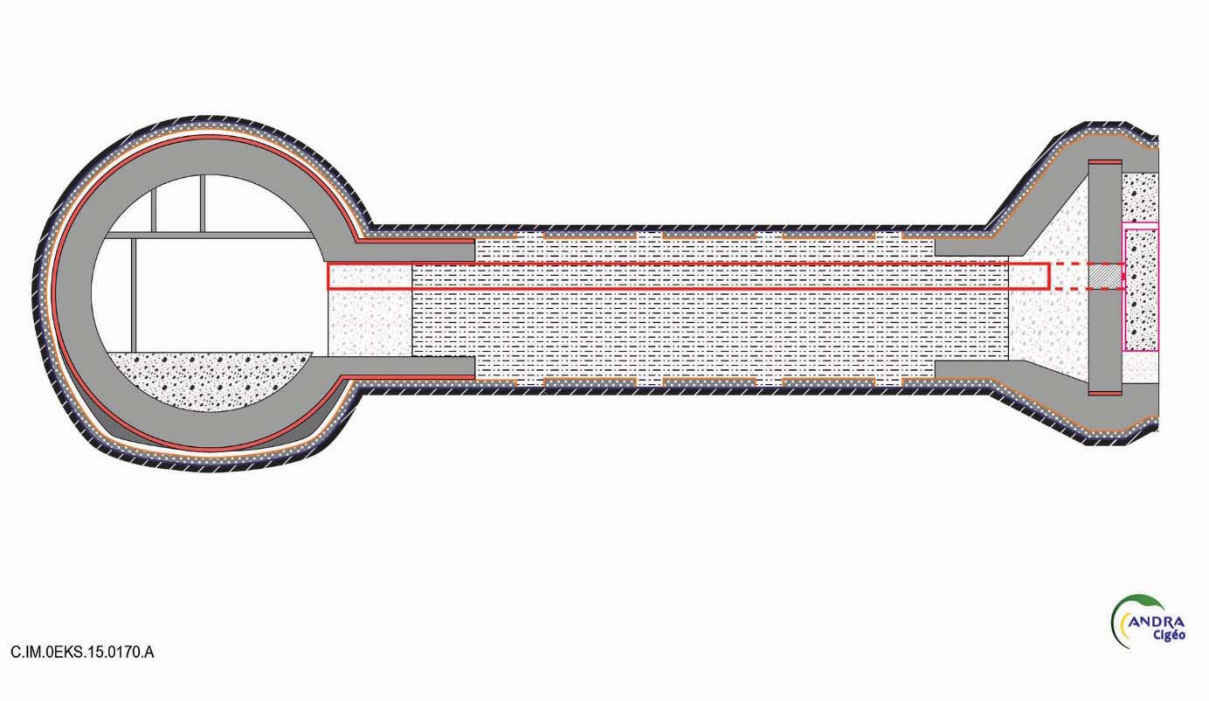
Ce dispositif est un conduit métallique débouchant dans l'alvéole, traversant le mur d'obturation et fermé côté cellule de manutention par un raccord étanche de type « Staubli » et une vanne. Il est conçu pour mesurer la pression de l'atmosphère de l'alvéole et transférer dans une éprouvette un prélèvement du gaz de l'alvéole pour analyse chimique et mesure de la concentration en hydrogène. Ce dispositif est protégé lors du remblayage de la galerie par une cloche métallique étanche. Le raccord permet la détente des gaz potentiellement présents dans la cloche avant sa dépose. Plusieurs dispositifs de ce type pourraient éventuellement être intégrés dans le mur d'obturation (par exemple en position haute et basse). Pour plus de robustesse, il pourrait le cas échéant être doublé d'un conduit fermé (par exemple par une tape), qui pourrait être percé en cas de dysfonctionnement du raccord étanche. La présence d'aérosols radioactifs dans l'alvéole pourrait ainsi être vérifiée.

Une fois le percement du mur d'obturation finalisé (et son équivalent côté galerie de ventilation) un balayage est effectué pour chasser les gaz présents dans l'alvéole. Une fois les risques liés à la présence de gaz maîtrisés, la déconstruction du mur est finalisée et une ventilation « procédé » de l'alvéole peut être remise en service.

La remise en place des équipements nécessaires au retrait dans la cellule de manutention et dans la galerie d'accès est ensuite exécutée. Une fois les essais de mise en service de ces équipements réalisés, les opérations de retrait commencent par le retrait des blocs du mur de radioprotection, par une vérification spécifique de la partie utile de l'alvéole, puis par les colis de stockage de la couche supérieure.

3.6.3.2 Côté galerie de retour d'air

Lors de la réouverture d'un alvéole, aucune disposition particulière n'est à prendre en vue de réutiliser cet alvéole ultérieurement. Il peut donc être procédé à l'exécution d'un forage depuis la galerie de



retour d'air.

Figure 3-26 Schématisation d'une réouverture par forage côté galerie de retour d'air (sur la base des études d'APS)

Le forage est chemisé sur toute sa longueur. Il s'ancre dans le béton du massif d'appui. Le forage du massif est finalisé par une méthode douce réalisé en mettant en œuvre un système d'étanchéité (type presse étoupe côté galerie de retour d'air). Ces travaux sont envisagés en présence d'une ventilation secondaire de type « travaux ».

Après balayage des gaz de l'alvéole MA-VL, la ventilation « procédé » de l'alvéole peut être remise en service.

Les études préliminaires montrent la capacité à déconstruire les ouvrages de fermeture en tête et au fond des alvéoles MA-VL, sous réserve de précautions opérationnelles spécifiques, en particulier concernant les méthodes de découpe utilisées pour les ouvrages en béton situés à l'interface de la partie utile de l'alvéole, la caractérisation et le drainage des gaz accumulés dans l'alvéole et la remise en service de la ventilation.

3.6.4 Réouverture des alvéoles HA0

Les opérations de réouverture d'un alvéole HA0 comprennent :

- le retrait du matériau d'obturation en tête d'alvéole par forage depuis la galerie ;
- le drainage de l'eau éventuellement présente dans l'alvéole vers des cuves (le dispositif de drainage en place est le cas échéant réutilisé si opérationnel ou remplacé par un système équivalent) ;
- le retrait du bouchon de radioprotection de fermeture et son remplacement par un bouchon de radioprotection d'exploitation.

En préalable à ces opérations, une analyse et une évacuation des gaz accumulés dans l'alvéole, ainsi qu'un éventuel inertage de l'alvéole sont réalisés au travers de la bride de fermeture présente à l'interface entre la galerie et la tête d'alvéole.

Une fois l'alvéole rouverte, la tête d'alvéole est remise en service, notamment par brossage et évacuation des produits de corrosion. Une vérification spécifique de la partie utile de l'alvéole et de l'état des conteneurs de stockage est réalisée, puis les opérations de retrait peuvent commencer.

Les études préliminaires montrent la capacité à déconstruire les ouvrages de fermeture en tête des alvéoles HA0, sous réserve de précautions opérationnelles spécifiques, en particulier concernant l'analyse et l'évacuation préalable des gaz accumulés dans l'alvéole.

3.6.5 Programme d'essais de déconstruction des ouvrages de fermeture

3.6.5.1 Introduction

L'Andra a prévu de mener un programme d'essais de déconstruction des ouvrages de fermeture des alvéoles et des galeries de Cigéo pour valider leur aptitude à la déconstruction. Ces essais ont pour objectif de mieux appréhender les performances des équipements utilisés, les conditions opérationnelles et les difficultés susceptibles d'apparaître lors des opérations de déconstruction. Ils permettront de disposer, à termes, d'éléments probants sur la capacité à revenir éventuellement sur des décisions de fermeture. Ces études seront approfondies, notamment pour s'adapter à d'éventuelles évolutions des options de conception des ouvrages de fermeture.

3.6.5.2 Scellement

L'Andra n'a pas engagé à ce jour d'essai de déconstruction d'un ouvrage figurant spécifiquement un scellement de galerie ou, éventuellement, d'alvéole MA-VL. Toutefois, elle a mis à profit les opérations de démantèlement de l'essai FSS (« Full Scale Seal » conduit dans le cadre du projet européen DOPAS) pour acquérir une première expérience de la déconstruction d'un ouvrage de scellement horizontal.

L'essai FSS, réalisé en 2014 à Saint-Dizier, est un essai de construction industrielle d'un scellement horizontal. Ce prototype est représentatif par ses dimensions des scellements horizontaux susceptibles d'être installés dans Cigéo. La Figure 3-27 présente la constitution physique de FSS, comprenant un noyau d'argile et deux massifs d'appui en béton bas pH.

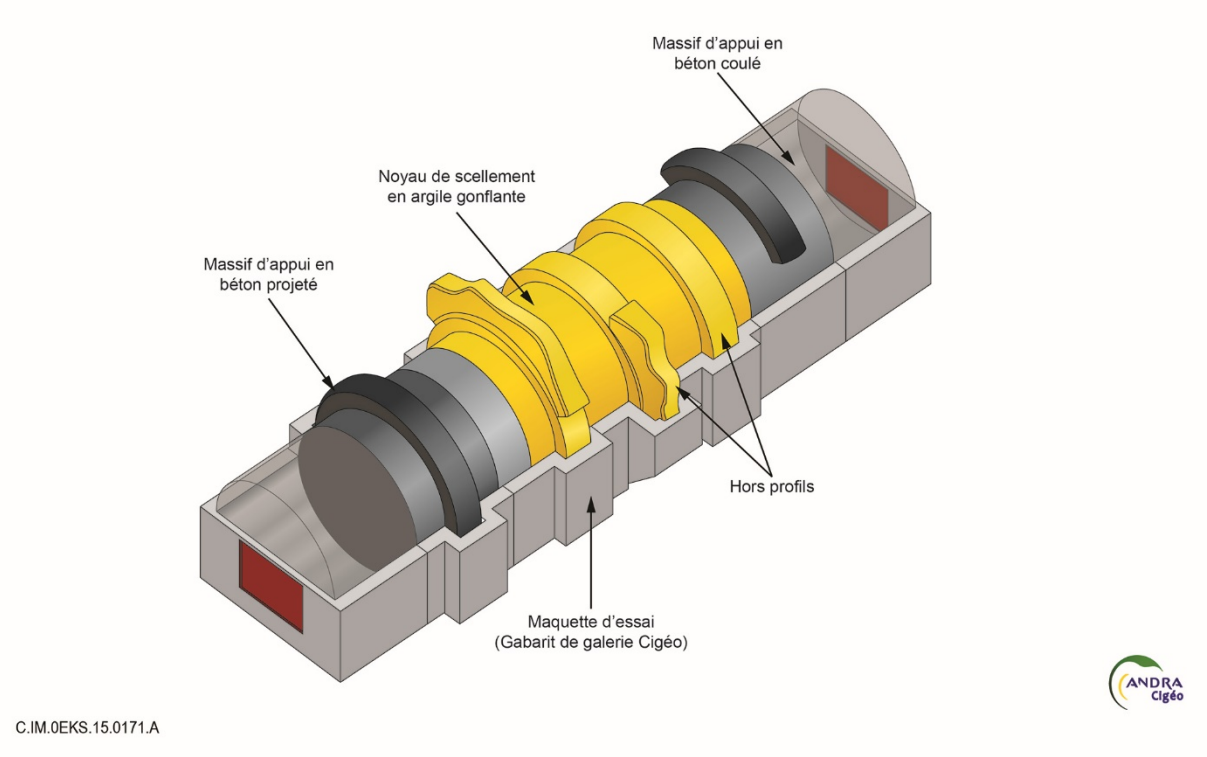


Figure 3-27 Principe de construction du scellement FSS

Lors de son démantèlement, l'Andra a testé une méthode de déconstruction douce des massifs d'appui en béton, par carottages préalables, puis sciage au câble diamant. Cette disposition de déconstruction préfigure une méthode permettant de préserver le revêtement en béton en portion courante de la galerie ou en tête d'alvéole et d'approcher « en douceur » du mur de radioprotection.[28] La Figure 3-28 ci-après illustre le type de dispositif de découpe utilisé.

[28] Par opposition aux méthodes minières classiques de creusement : foration-tir, brise-roche hydraulique ou machine à attaque ponctuelle.

Figure 3-28 Carottage et sciage du massif d'appui en béton bas pH du scellement FSS

3.6.5.3 Ouvrage d'obturation des alvéoles HA

A ce stade des études, l'Andra n'a pas encore achevé la définition du matériau d'obturation de l'alvéole HA. Dès que celle-ci sera finalisée, de premiers essais de déconstruction d'un ouvrage d'obturation HA en surface et dans le Laboratoire souterrain seront programmés.

3.6.5.4 Remblais

A ce stade des études, l'Andra n'a pas encore achevé la définition des remblais pour les galeries et éventuellement la tête des alvéoles MA-VL, même s'il est prévu de réutiliser les argilites extraites lors du creusement et stockées sur les verses. Dès que celle-ci sera finalisée, de premiers essais de déconstruction de remblais en surface et dans le Laboratoire souterrain seront programmés.

3.7 Dispositions conservatoires

3.7.1 Définition

Une disposition conservatoire a pour but de préserver la possibilité d'une action. Dans le cadre de la récupérabilité, la conception a prévu des emplacements réservés pour l'éventuelle mise en place d'équipements ou l'ajout de fonctionnalités favorisant des opérations de retrait non programmées dans le déroulement de référence du projet (5). Il s'agit notamment des opérations qui seraient mises en œuvre dans le cas de certains scénarios hypothétiques de retrait (cf. § 4.3 du présent document).

Les équipements disponibles en exploitation pour le retrait (par exemple le robot-tracteur) ou ceux qui sont étudiés et pourrait être approvisionnés spécifiquement pour une opération de retrait (par exemple le système de brossage éventuel des alvéoles HA) ne sont pas considérés comme des dispositions conservatoires.

3.7.2 Dispositions conservatoires dans la cellule de manutention des alvéoles MA-VL

Les mesures conservatoires pour le retrait des colis de stockage MA-VL consistent à prévoir, dans chaque cellule de manutention, l'espace permettant la mise en place d'un dispositif de contrôle et de fixation de la contamination sur les conteneurs de stockage. Ces équipements sont mis en place, si nécessaire, préalablement ou au cours d'une opération de retrait. Pour cela, les surfaces au sol sont préservées pour leur implantation éventuelle. Le radier de la cellule de manutention sera équipé de systèmes d'ancrage et des fourreaux en attente pour le passage des câbles. Des passages de câbles en réserve sont prévus dans les différentes cloisons. Les accès de la cellule de manutention sont prévus pour permettre l'introduction de ces équipements.

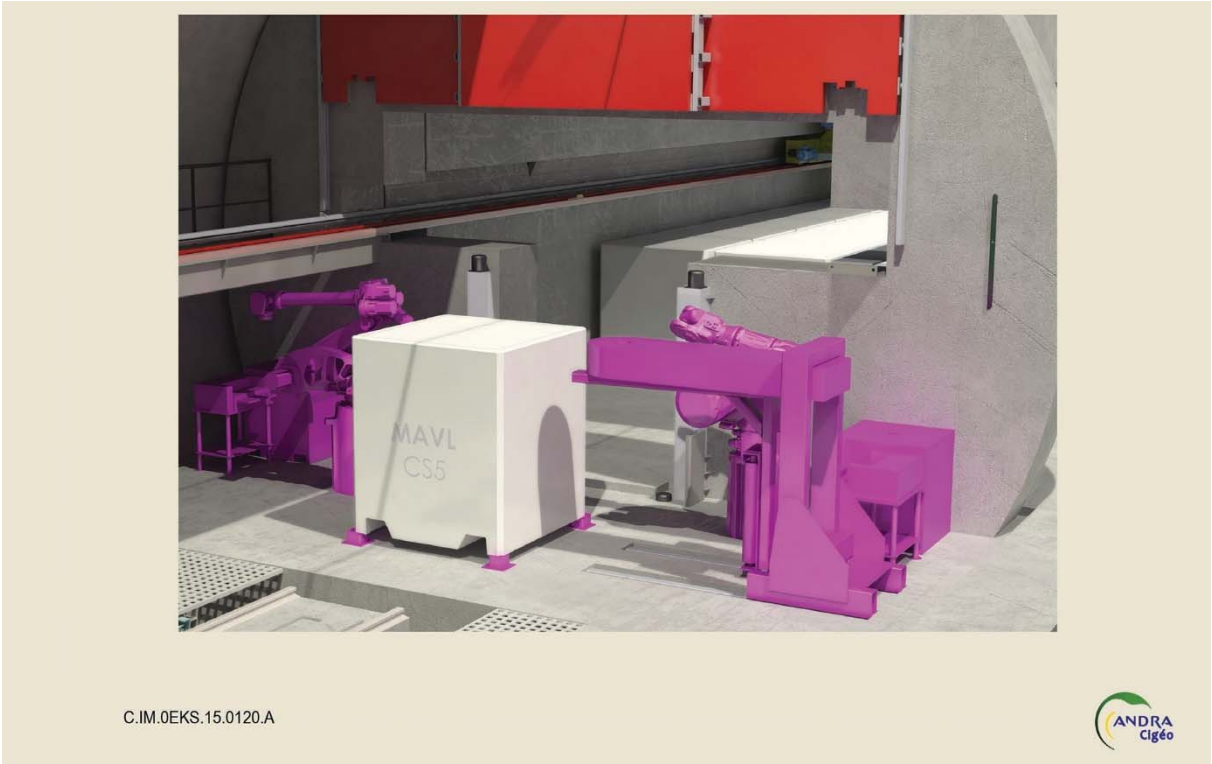


Figure 3-29 Équipements de contrôle et de traitement de la contamination – exemple d'un colis CS1-5 (sur la base des études d'APS)

3.7.3 Dispositions conservatoires dans les alvéoles HA

En dehors des mesures prises pour la conception des conteneurs de stockage (gorge de préhension pour le retrait) et de l'alvéole (jeu fonctionnel tenant compte de l'ovalisation du chemisage), aucune disposition conservatoire particulière n'est prévue au niveau des alvéoles HA.

3.7.4 Dans les installations de surface

Les opérations de retrait nécessiteront ou non la construction d'ateliers complémentaires en surface en fonction :

- de leur date et de leurs conditions de mise en œuvre (notamment si des opérations de stockage sont continuées ou interrompues pendant le retrait) ;
- de leur ampleur (1 ou plusieurs colis, plusieurs alvéoles, voire l'ensemble du stockage) ;
- des flux de retrait et de réexpédition souhaités (égaux ou supérieurs aux flux de dimensionnement des installations EP1 et EP2).

Les principales fonctionnalités potentielles de ces bâtiments, complémentaires à celles disponibles sur EP1 et EP2, sont la préparation à l'expédition, l'entreposage pour gestion des flux de réexpédition

(entreposage « tampon »), la réexpédition, le soutien aux activités de réouverture de parties fermées du stockage.

Des emprises sont laissées libres à proximité des installations de surface pour permettre la construction éventuelle de ces bâtiments. Des ferraillages idoines (réservations) sont prévus au niveau des voiles externes de ces installations pour faciliter le raccordement de blocs modulaires complémentaires. Les cheminements dans les installations de surface sont compatibles avec ces raccordements.

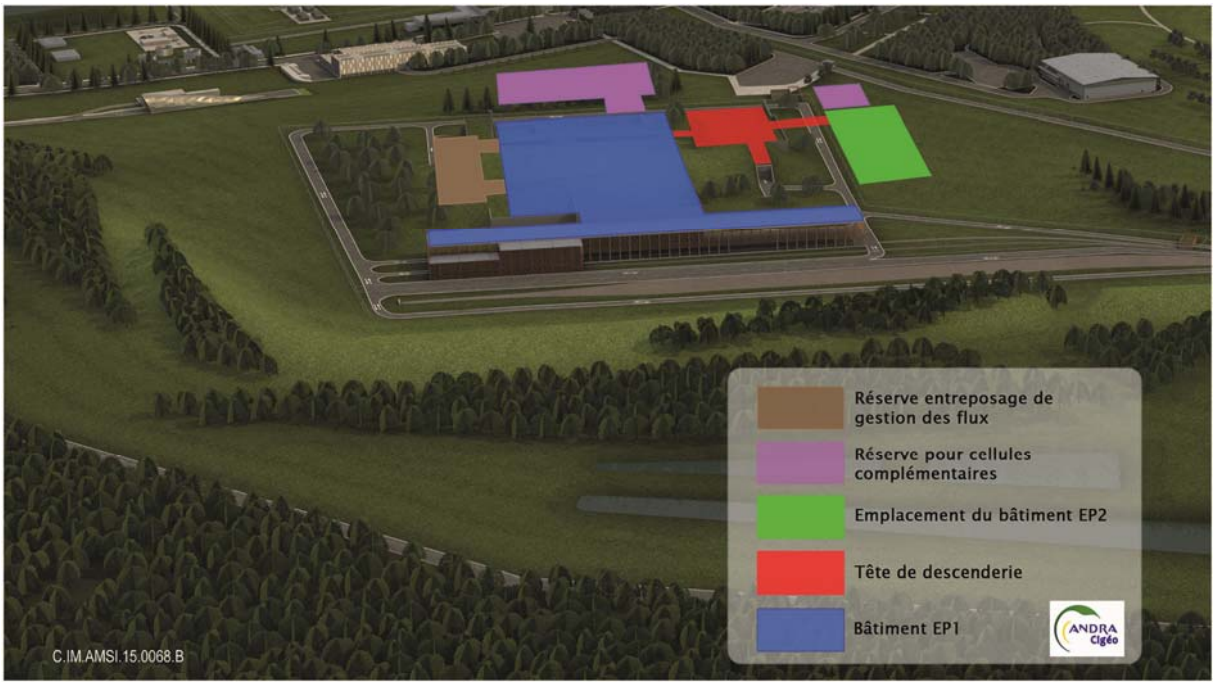


Figure 3-30 Localisation des réserves d'emprise foncière en surface pour la récupérabilité (sur la base des études d'APS)

3.7.5 Synthèse des dispositions conservatoires

Les principales dispositions conservatoires prises en lien avec la récupérabilité consistent à réserver des surfaces pour l'ajout d'équipements dans les cellules de manutention des alvéoles MA-VL, ainsi qu'à réserver des emprises foncières en surface pour la construction de bâtiments qui pourraient éventuellement être nécessaires à l'expédition des colis retirés en fonction notamment du flux d'expédition envisagé.

3.8 Dispositions d'exploitation

3.8.1 Introduction

Une fois Cigéo construit, l'Andra met en œuvre, en complément de la surveillance des conditions de retrait (cf. § 3.4 du présent document), un ensemble de dispositions d'exploitation en lien avec la récupérabilité. Elles ont pour principaux objectifs de valider la capacité à retirer les colis des alvéoles en situation industrielle, de contrôler la qualité des colis stockés et de gérer les connaissances nécessaires pour programmer une opération de retrait de colis.

3.8.2 Validation de la capacité à retirer les colis en situation industrielle

3.8.2.1 Essais de retrait préalables à la mise en service de Cigéo

La méthode d'essais de démarrage de l'installation procède par intégration successive des équipements en respectant une progression depuis les essais de l'équipement ou de la machine

élémentaire, puis de l'ensemble fonctionnel, puis de l'installation dans sa globalité. Cette démarche est décrite en annexe 1 au présent document.

Pour la mise en service, des essais fonctionnels de retrait de colis de stockage seront menés dans Cigéo pour valider les fonctions de base du retrait. Ils s'inscriront dans le cadre général des essais de démarrage de l'installation.

Les essais menés dans un premier temps sur des maquettes de colis inactives ont pour objectif de démontrer que les fonctions de base des équipements industriels et de l'installation, telle que construite, permettent le retrait des colis de stockage dans les alvéoles HA0 et MA-VL tout en garantissant la sécurité. La capacité des équipements de la chaîne cinématique à retirer les colis de stockage des alvéoles et à les remonter dans les installations de surface sera testée. Ces essais permettront notamment de valider les différentes interfaces (géométriques, fluides, mécaniques, contrôle-commande…) depuis l'alvéole de stockage, jusqu'à la cellule de reconditionnement en surface.

Puis, toujours au cours de la phase industrielle pilote, des essais de retrait portant sur des colis de déchets MA-VL et HA0 seront réalisés dans le cadre de l'autorisation de mise en service de Cigéo. Les séquences complètes d'opérations de retrait de colis actifs seront vérifiées. Des exemples de séquences testées sont présentés en annexe 2 au présent document.

Les essais de retrait réalisés sur des colis actifs, permettront de prendre en compte et de caractériser les conditions ambiantes effectives initiales pour les opérations de retrait. Ils permettront également de vérifier et de valider les règles générales d'exploitation (RGE) (25) et les documents d'exploitation, ainsi que d'évaluer l'efficacité de l'intégration des aspects liés aux facteurs humains.

3.8.2.2 Essais de retrait prévus après la mise en service

Les activités d'exploitation seront décrites dans les RGE et dans les documents d'exploitation qui en découleront. Le personnel en charge de l'exploitation sera formé au pilotage de l'installation, y compris pour la fonction de retrait de colis de stockage. Cette formation est fondée sur les modes opératoires définis lors des essais de mise en service de l'installation. Elle fait l'objet de mises en situation périodiques tout au long de l'exploitation de l'installation sur les démonstrateurs inactifs d'alvéoles prévues dans la zone de soutien logistique. Ces formations et mises en situations périodiques permettront éventuellement de faire évoluer les modes opératoires, notamment si des équipements de retrait nouveaux étaient développés. Elles porteront sur des maquettes de colis de stockage MA-VL et HA0.

Par ailleurs, dans le cadre du programme de maintenance et de « contrôles et essais périodiques » de l'exploitant, la disponibilité, la fiabilité, la fonctionnalité et l'intégrité de la fonction de retrait des colis de stockage seront maintenues pour tous les alvéoles en cours de remplissage.

A l'issue de leur remplissage, certains équipements sont éventuellement réutilisés pour l'exploitation d'autres alvéoles ou mis sous cocon en attente d'une éventuelle réutilisation dans le cadre d'une opération de retrait (cf. § 2.3.4.3 du présent document). En attente de la fermeture des alvéoles, les programmes de maintenance, de contrôle et d'essais périodiques porteront notamment sur les équipements participant à la surveillance des conditions de retrait.

3.8.3 Contrôles

Les contrôles sont des mesures qui permettent de vérifier qu'un ou plusieurs paramètres spécifiés sont respectés. Par exemple, des contrôles en ligne mis en œuvre dans les installations de surface permettent de vérifier la conformité des colis primaires reçus et des colis de stockage aux spécifications d'acceptation des colis de Cigéo (17).

Pour ce qui concerne le colis, le processus de contrôle repose sur deux grands principes :

- un processus d'acceptabilité/acceptation qui permet de garantir que tous les colis qui seront stockés dans Cigéo respecteront les critères d'acceptation de Cigéo (6). Ce processus est

constitué de tâches administratives (agrément, accord de livraison, bordereau…) qui précèdent le plus souvent les tâches opérationnelles ;
- un processus de gestion des transferts de colis dans Cigéo liés à l'exploitation qui permet de connaître la position du colis en temps réel dans les locaux, contrôle les transferts et gère ainsi le flux à l'intérieur des installations de surface jusqu'à son stockage en alvéole. Ce processus comprend également le contrôle visuel et dimensionnel, la masse, le débit de dose, la contamination surfacique du colis.

En exploitation, les contrôles sur les colis primaires et sur les conteneurs de stockage reçus et sur les colis de stockage assemblés permettent de vérifier qu'ils présentent les caractéristiques attendues pendant toute la durée de l'exploitation, y compris celles en lien avec les fonctions liées à la récupérabilité (cf. § 3.3 du présent document).

Les typologies de mesures seront précisées dans le cadre de la DAC en fonction des dispositions qui seront mises en œuvre avant l'expédition des colis primaires vers Cigéo.

3.8.4 Gestion des informations

Le système d'information et de gestion des colis de Cigéo est interfacé avec le système d'information global « PRISCA » (base de données d'informations techniques relatives au colis depuis son détenteur jusqu'à son stockage).

Par ailleurs, le système de contrôle commande du procédé permettra de connaître :

- la position de chaque colis primaire et de stockage dans l'installation en temps réel ;
- les informations relatives aux colis primaires et aux colis de stockage, par exemple la typologie des colis primaires et leurs caractéristiques radiologiques ;
- la cartographie de tous les alvéoles.

Ces informations permettront d'avoir une connaissance très précise du nombre, de la nature, de la typologie et de la position des colis reçus.

En outre, le système d'information de Cigéo permettra de conserver et d'utiliser l'ensemble des données acquises par la surveillance de l'installation. Dans le cas d'une éventuelle décision de retrait, ces informations constituent une source d'information fondamentale pour programmer les opérations.

De plus, l'Andra étudie la possibilité de conserver des échantillons de l'ensemble des matériaux utilisés pour la construction des composants de Cigéo (par exemple le béton des conteneurs MA-VL). Ces échantillons seront disponibles sur toute la durée d'exploitation de Cigéo pour des mesures et des caractérisations complémentaires, notamment en préalable à une éventuelle opération de retrait.

Toutes ces connaissances feront l'objet d'un archivage détaillé. Elles seront conservées pendant toute la durée de l'exploitation et au-delà. La maîtrise du contenu des colis et de l'inventaire du stockage permet d'assurer la connaissance du site et participe à la transmission de sa mémoire, y compris après sa fermeture définitive.

3.8.5 Synthèse des dispositions d'exploitation liées à la récupérabilité

L'exploitant de Cigéo met en œuvre des dispositions techniques et organisationnelles en lien avec la récupérabilité. Il s'agit notamment d'essais de retrait menés pendant la phase industrielle pilote sur les équipements de la chaîne cinématique industrielle pour démontrer leur capacité à retirer les colis de stockage des alvéoles et à les remonter dans les installations de surface. Par ailleurs, le personnel en charge de l'exploitation et de la maintenance de Cigéo sera formé aux opérations et à la maintenance des équipements de retrait. Les contrôles de conformité des colis de stockage menés en exploitation permettront de vérifier qu'ils présentent les caractéristiques attendues en lien avec les fonctions liées à la récupérabilité. Le système de gestion des informations permettra de disposer de la source d'information la plus complète pour la préparation et la mise en œuvre d'une éventuelle opération de retrait.

3.9 Réévaluations périodiques de la récupérabilité

Pour l'autorisation de mise en service de Cigéo vers 2030 (autorisation de stockage de premier colis de déchets), dans le cadre du bilan de la phase industrielle pilote, puis à l'occasion de chaque réexamen de sûreté, l'Andra produira une analyse relative aux conditions de récupérabilité des colis stockés dans Cigéo. Cette analyse fera un point complet du retour d'expérience de l'exploitation des équipements utiles pour un éventuel retrait, des résultats de la surveillance des paramètres spécifiques à la récupérabilité, des démonstrations périodiques et des résultats des programmes d'essais de retrait menés *in situ* et hors de Cigéo.

Elle sera transmise aux parties intéressées dans le cadre des mécanismes de participation mis en place pour la gouvernance de Cigéo en lien avec la réversibilité du stockage.

Elle permettra d'informer, au mieux de la connaissance, sur les conditions dans lesquelles d'éventuelles opérations de retrait de colis pourraient être mises en œuvre.

4

Scénarios de retrait étudiés

4.1 Définitions 88
4.2 Scénarios de retrait d'exploitation 90
4.3 Scénario hypothétiques 100

4.1 Définitions

4.1.1 La notion de scénario

Un scénario de retrait est constitué d'une succession d'opérations élémentaires réalisées dans Cigéo, en lien avec la décision de retirer au moins un colis de l'alvéole dans lequel il est stocké. Chaque opération créant une situation intermédiaire nouvelle, la description d'un scénario inclut la description de l'enchaînement des situations intermédiaires depuis la situation initiale, jusqu'à la situation finale (cf. Figure 4-1).

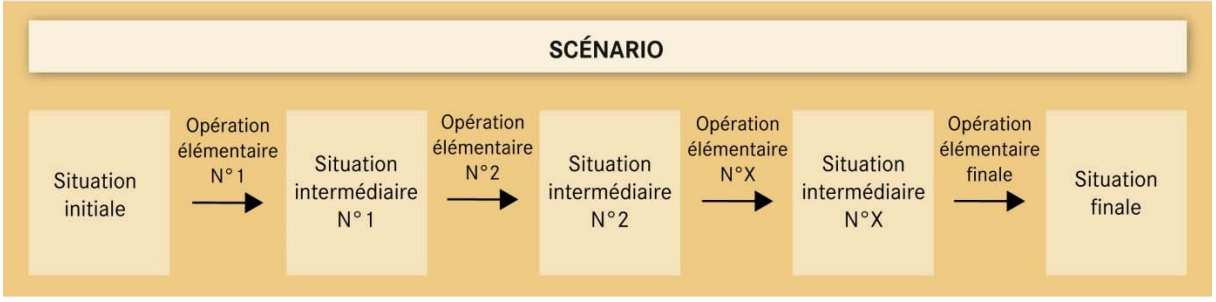


Figure 4-1 Représentation schématique de la notion de scénario

Une opération élémentaire d'un scénario de retrait est une opération d'exploitation réalisée en lien avec la décision de retirer un ou des colis stockés. Il s'agit notamment des opérations de préparation du retrait (maintenance, rééquipement…), de contrôle des colis, de manutention et d'entreposage temporaire ou de mise en stockage des colis de stockage retirés dans un autre alvéole.

Une situation d'un scénario de retrait est constituée d'un ensemble de données de base décrivant la situation de l'installation au moment de l'engagement ou à l'issue de la réalisation d'une opération élémentaire d'un scénario de retrait (état phénoménologique des colis, position des colis à retirer, état phénoménologique de l'alvéole, stade de fermeture, installations utilisées pour les opérations de retrait…).

Les scénarios de retrait sont rattachés à deux catégories : les scénarios « d'exploitation » et les scénarios « hypothétiques ». Ces scénarios sont définis pour permettre d'analyser la capacité de l'installation à mener à bien les opérations de retrait, en particulier les temps opératoires requis et les conditions de fonctionnement de l'installation (possibilité de continuer la réception et la mise en stockage d'autres colis pendant les opérations de retrait, modification de l'installation nécessaire ou non, dispositions particulières à mettre en place). L'étude de ces scénarios et leurs futurs approfondissements permettront, à terme, de disposer de l'ensemble des informations utiles dans le cadre des décisions qui jalonnent le déroulement du projet Cigéo (5).

Par conception, les opérations de retrait sont réalisées dans une logique dite « FILO » (« first in, last out »), selon laquelle les premiers colis stockés dans un alvéole sont les derniers retirés.

Les scénarios de retrait étudiés dans le DORec (cf. § 4.2 et 4.3 du présent document) ont été définis pour couvrir un ensemble de situations possibles sans prétendre à l'exhaustivité. Il n'est pas possible de préjuger à ce stade de l'ensemble des décisions de retrait qui pourraient être prises sur la durée d'exploitation du stockage.

4.1.2 Catégories de scénarios de retrait

4.1.2.1 Scénario de retrait d'exploitation et évaluation de sûreté

Les scénarios de retrait d'exploitation correspondent à des scénarios de retrait de certains colis juste stockés, ou en cours de mise en stockage. Ils sont utiles pour l'exploitation de Cigéo et font partie intégrante de cette exploitation.

Ces scénarios de retrait sont mis en œuvre ponctuellement, sur un nombre limité de colis de stockage MA-VL ou HA, par exemple à des fins de vérification ponctuelle, d'utilisation de colis déjà stockés pour des essais actifs ou de réorganisation des alvéoles.

Les scénarios de retrait d'exploitation sont mis en œuvre dans des alvéoles dans lesquels l'ensemble des équipements de manutention sont opérationnels, c'est-à-dire qu'ils sont, soit en cours de remplissage, soit, après leur remplissage, dans la phase d'attente de mise sous cocon ou de démontage de leurs équipements de manutention (cf. § 2.3.4.3 et 2.3.4.4 du présent document). Cette attente de mise sous cocon est, en référence, prévue pour durer 1 an après la fin du remplissage.

Les opérations élémentaires nécessaires à la mise en œuvre des scénarios de retrait d'exploitation sont incluses dans le périmètre de la demande d'autorisation de création (DAC). A ce titre, elles feront l'objet d'une démonstration de sûreté dans le Rapport préliminaire de sûreté (RPrS) joint à la DAC et, pour la mise en service de l'installation, elles seront déclinées dans les Règles Générales d'Exploitation (RGE). Elles correspondent à des situations de fonctionnement normal de l'installation (25).

Des essais permettant de valider la possibilité de mise en œuvre des scénarios de retrait d'exploitation sont intégrés aux essais menés pendant la phase industrielle pilote pour la réception des équipements et pour la mise en service de l'installation.

Pour cette catégorie de scénarios de retrait, l'évaluation de sûreté est équivalente à celle des opérations de stockage des colis. Les options de sûreté retenues pour les opérations de stockage sont décrites dans la partie du DOS relative à l'exploitation (6). A ce stade du projet, elles couvrent les opérations mises en œuvre dans les scénarios de retrait d'exploitation. Il faut toutefois souligner que dans le cas des colis HA0, le robot utilisé pour le retrait (robot tracteur) n'est pas le même que celui pour la mise en place (robot pousseur). Toutefois, les options de sûreté retenues pour la conception des deux robots sont identiques.

4.1.2.2 Scénarios hypothétiques de retrait et évaluation de sûreté

Les scénarios hypothétiques de retrait correspondent à des scénarios dont la mise en œuvre est possible par conception de Cigéo, mais qui ne sont pas programmés, à ce stade du projet, dans le déroulement de référence du projet décrit dans la proposition de PDE (5).

Les scénarios hypothétiques de retrait comportent des scénarios qui seraient éventuellement mis en œuvre, dans le cadre de la réversibilité, suite à une mise en cause de la finalité du stockage comme mode de gestion de tout ou partie des déchets radioactifs stockés. Ils sont étudiés pour évaluer les conditions opérationnelles dans lesquelles ils pourraient être mis en œuvre. Les colis repris sont expédiés hors de Cigéo, vers la filière alternative de gestion choisie. Une telle décision de retrait serait prise en tenant compte de la disponibilité des moyens de transport et de gestion des déchets retirés (cf. § 1.2.2 du présent document).

Notre génération n'ayant pas pour intention de retirer des colis du stockage, l'Andra ne prévoit pas de demander, dans la DAC, l'autorisation de mettre en œuvre ces scénarios hypothétiques de retrait. L'étude des scénarios hypothétique est donc moins détaillée que celle des scénarios de retrait d'exploitation. Leur approche en termes de sûreté est uniquement préliminaire. Elle consiste principalement à vérifier qu'ils sont compatibles avec les dispositions de conception et les dispositions conservatoires décrites au chapitre 3 du présent DORec. Il appartiendra à la génération qui souhaiterait mettre en œuvre de telles opérations de retrait d'en finaliser les évaluations de sûreté sur la base des connaissances et des techniques disponibles à cette échéance et de procéder, pour en obtenir l'autorisation, selon les processus réglementaires qui seront en vigueur pour ce type d'opérations.

Les scénarios hypothétiques de retrait incluent également une situation de contamination du colis de stockage MA-VL, qu'elle qu'en soit la cause. Ce scénario hypothétique est étudié pour justifier dans quelle mesure la conception de Cigéo offre la possibilité à l'exploitant de faire face à cette situation, éventuellement en prenant des dispositions complémentaires. Cette situation de contamination des colis de stockage ne correspond pas à une évolution attendue ou prévisible au cours de leur stockage. En situation normale, les colis de stockage restent *a priori* radiologiquement propres pendant toute la durée de l'exploitation. Cette situation est étudiée à titre de précaution.

Compte tenu de la robustesse des conteneurs de stockage HA0 (cf. § 3.3.3 du présent document), une perte de confinement et une contamination n'est pas envisagée.

4.2 Scénarios de retrait d'exploitation

4.2.1 Introduction

Deux scénarios de retrait d'exploitation sont envisagés par l'Andra. Il s'agit :

- du retrait d'un colis de stockage d'un alvéole et de son retour en surface ;
- du retrait de colis de stockage d'un alvéole et de leur transfert dans un ou plusieurs autres alvéoles de stockage.

Le colis de stockage remonté en surface est dirigé vers la cellule de déconditionnement. Le choix de cette cellule ne marque pas la volonté de l'Andra de procéder à la réouverture du colis. Cette cellule a été choisie de façon conventionnelle pour la flexibilité des moyens d'intervention dont elle dispose ou qui peuvent y être implantés, pour ses performances en terme de confinement et parce qu'elle permet, compte tenu de sa position centrale dans l'installation de surface, soit de diriger le colis de stockage vers d'autres cellules ou locaux de l'installation de surface, soit de le renvoyer dans l'installation souterraine de stockage.

S'agissant du transfert de colis dans un ou plusieurs autres alvéoles, l'étude n'identifie pas de contrainte particulière pour l'alvéole de destination. Celle-ci est supposée disponible et sa géométrie compatible avec la réception des colis retirés. En pratique, il est possible qu'à certaines périodes du stockage, l'exploitant ne puisse pas bénéficier de ce scénario pour des raisons de disponibilité d'alvéole. Une fois satisfaits les besoins d'exploitation ayant justifié la mise en œuvre du scénario, les colis peuvent être replacés dans l'alvéole initial. Ces opérations de retour sont équivalentes à celles du stockage et ne sont pas traitées dans l'étude.

A ce stade, l'étude des scénarios d'exploitation prend la forme d'une description de leurs étapes élémentaires sous forme de logigrammes. Ces scénarios sont menés dans le cadre du fonctionnement normal de Cigéo. Les différents temps de cycle sont joints à l'analyse à titre indicatif. Ils ne constituent pas un engagement de résultat. A ce titre, n'ayant pas, à ce stade, fait l'objet de simulation dynamique, les scénarios et leurs temps de cycle sont amenés à évoluer avec la poursuite des études d'APD. Néanmoins cette première approche permet notamment d'apprécier leur impact sur les flux de mise en stockage.

L'étude porte sur les colis MA-VL et sur les colis HA0. La mise en stockage des colis HA1/HA2 étant prévue à l'horizon 2075 dans le déroulement de référence décrit dans la proposition de PDE (5), l'Andra n'a pas encore procédé à l'étude de scénarios d'exploitation portant sur leur retrait.

4.2.2 Retrait d'un colis de stockage remonté en surface

4.2.2.1 Colis MA-VL

Ce scénario décrit la prise en charge du colis de stockage MA-VL dans l'alvéole, sa remontée en surface et son introduction dans la cellule de déconditionnement.

Comme pour tous les scénarios d'exploitation, l'alvéole est en cours de chargement ou juste après son remplissage. Tous les équipements de manutention et de surveillance nécessaires sont opérationnels ; il n'est pas nécessaire de prévoir une phase de remise à niveau des équipements ou une phase d'essai.

Le colis de stockage est directement[29] accessible et ne présente pas de détérioration qui risquerait de remettre en cause sa préhension et son transfert par les différents équipements de manutention.

Le colis de stockage récupéré n'est pas contaminé (vérification effectuée avant sa mise en stockage), il n'y a donc pas de contrôle de contamination avant sa mise en hotte au niveau de l'alvéole et son transfert en surface.

Tous les systèmes de manutention entrant dans le cycle de retrait du colis de stockage sont ceux utilisés pour la mise en stockage. L'estimation du temps de cycle de ce scénario est déterminée sur la base des temps des étapes élémentaires. Les vitesses et hauteurs de manutention sont équivalentes à celles de la mise en stockage. Les opérations élémentaires du scénario sont identifiées dans le logigramme en Figure 4-2 ci-après.

L'étude de ce scénario n'a pas identifié d'opérations non couvertes par les dispositions de sûreté mises en œuvre pour la mise en stockage. Elle confirme que, par rapport aux opérations de mise en place des colis, ce scénario peut être mis en œuvre sans ajout de dispositions complémentaires.

Le temps moyen de cycle de retrait d'un colis de stockage MA-VL est estimé à :

- 60 min pour le retrait du colis de l'alvéole jusqu'au chargement sur le funiculaire ;
- 30 min pour la remontée du funiculaire jusqu'au niveau de la tête de descenderie ;
- 80 min pour le déchargement de la hotte du funiculaire jusqu'au déchargement du colis de stockage dans la cellule de mise en hotte ;
- 10 min pour le transfert du colis de stockage de la cellule de mise en hotte vers la cellule de déconditionnement

La durée totale est de l'ordre de 180 min.

Le nombre maximal de colis de stockage/jour à stocker est estimé à 9 avec un cycle objectif de 1h30. Le retrait d'un colis de stockage MA-VL ne perturbe pas le flux nominal de mise en stockage.

[29] C'est-à-dire sans nécessité d'en déplacer d'autres pour permettre le retrait du colis de stockage considéré.

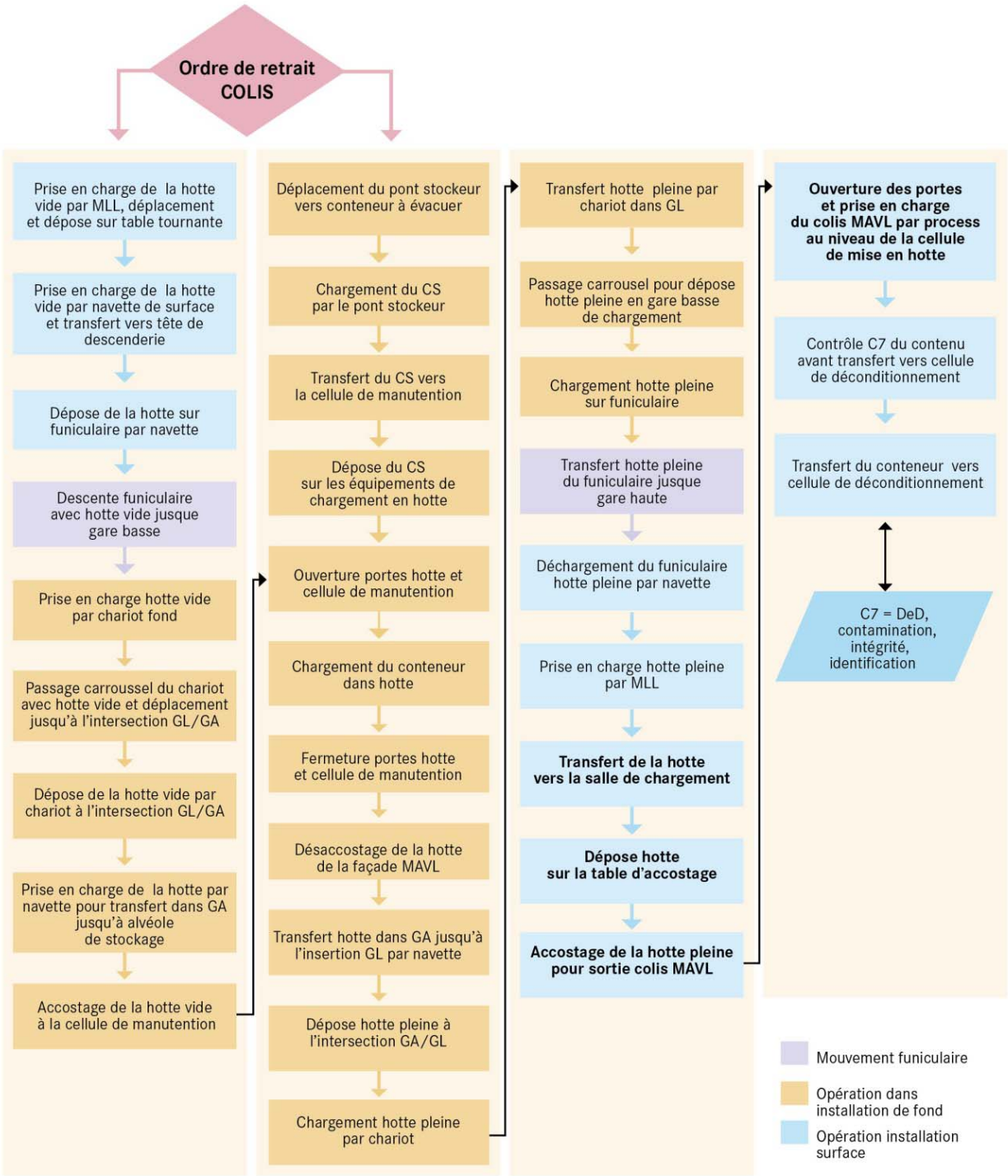


Figure 4-2 Logigramme de retrait d'un colis de stockage MA-VL (sur la base des études d'APS)

4.2.2.2 Colis HA0

Ce scénario décrit la prise en charge du colis de stockage HA0 dans l'alvéole, sa remontée en surface et son introduction dans la cellule de déconditionnement.

Comme pour tous les scénarios d'exploitation, tous les équipements de manutention et de surveillance nécessaires sont opérationnels ; il n'est pas nécessaire de prévoir une phase de remise à niveau des équipements ou une phase d'essais.

Le colis de stockage est accessible[30] et ne présente pas de détérioration qui risquerait de remettre en cause sa préhension et son transfert par les différents équipements de manutention.

Il n'est pas contaminé (vérification avant mise en stockage), il n'y a donc pas de contrôle de contamination avant sa mise en hotte au niveau de l'alvéole et son transfert en surface.

Tous les systèmes de manutention entrant dans le cycle de retrait du colis de stockage sont ceux utilisés pour la mise en stockage, à l'exception du robot tracteur et de sa hotte dédiée. L'estimation du temps de cycle de ce scénario est déterminée sur la base des temps des étapes élémentaires.

Par rapport à la mise en stockage, la température de la tête d'alvéole et du colis de stockage sont supérieures à celles de la mise en stockage en raison de la montée en température attendue de l'alvéole rempli. Toutefois, les équipements sont dimensionnés pour fonctionner dans une large gamme de températures couvrant cette situation. Les opérations élémentaires du scénario sont identifiées dans le logigramme en Figure 4-3 ci-après.

L'étude de ce scénario n'a pas identifié d'opérations non couvertes par les dispositions de sûreté mises en œuvre pour la mise en stockage. Elle confirme que, par rapport aux opérations de mise en place des colis, ce scénario peut être mis en œuvre sans ajout de dispositions complémentaires.

Le temps moyen de cycle de retrait d'un colis de stockage HA0 est estimé à :

- 120 min pour le retrait du colis de l'alvéole jusqu'au chargement sur le funiculaire pour l'alvéole le plus éloigné du quartier HA0 avec le colis de stockage à 80 m au fond de l'alvéole ;
- 30 min pour la remontée du funiculaire jusqu'au niveau de la tête de descenderie ;
- 80 min pour le déchargement de la hotte du funiculaire jusqu'au déchargement du colis dans la cellule de mise en hotte ;
- 10 min pour le transfert du colis de stockage de la cellule de mise en hotte vers la cellule de déconditionnement.

La durée totale est de l'ordre de 240 min.

Le retrait d'un colis de stockage HA0 est une opération ponctuelle. Toutefois, elle ne peut pas être menée sans perturber les flux de mise en stockage des autres colis de stockage HA0, car, temporairement, les équipements de manutention (hotte et chariot) sont entièrement destinés à l'opération de retrait et ne peuvent pas être utilisés pour une opération simultanée de mise en stockage d'autres colis de stockage HA0. Toutefois, cette perturbation reste peu significative et sans impact sur les flux globaux de réception.

Compte tenu de la séparation des flux de stockage, elle ne perturbe pas les opérations de mise en stockage des colis de stockage MA-VL.

[30] C'est-à-dire sans nécessité d'en déplacer d'autres pour permettre le retrait du colis de stockage considéré.

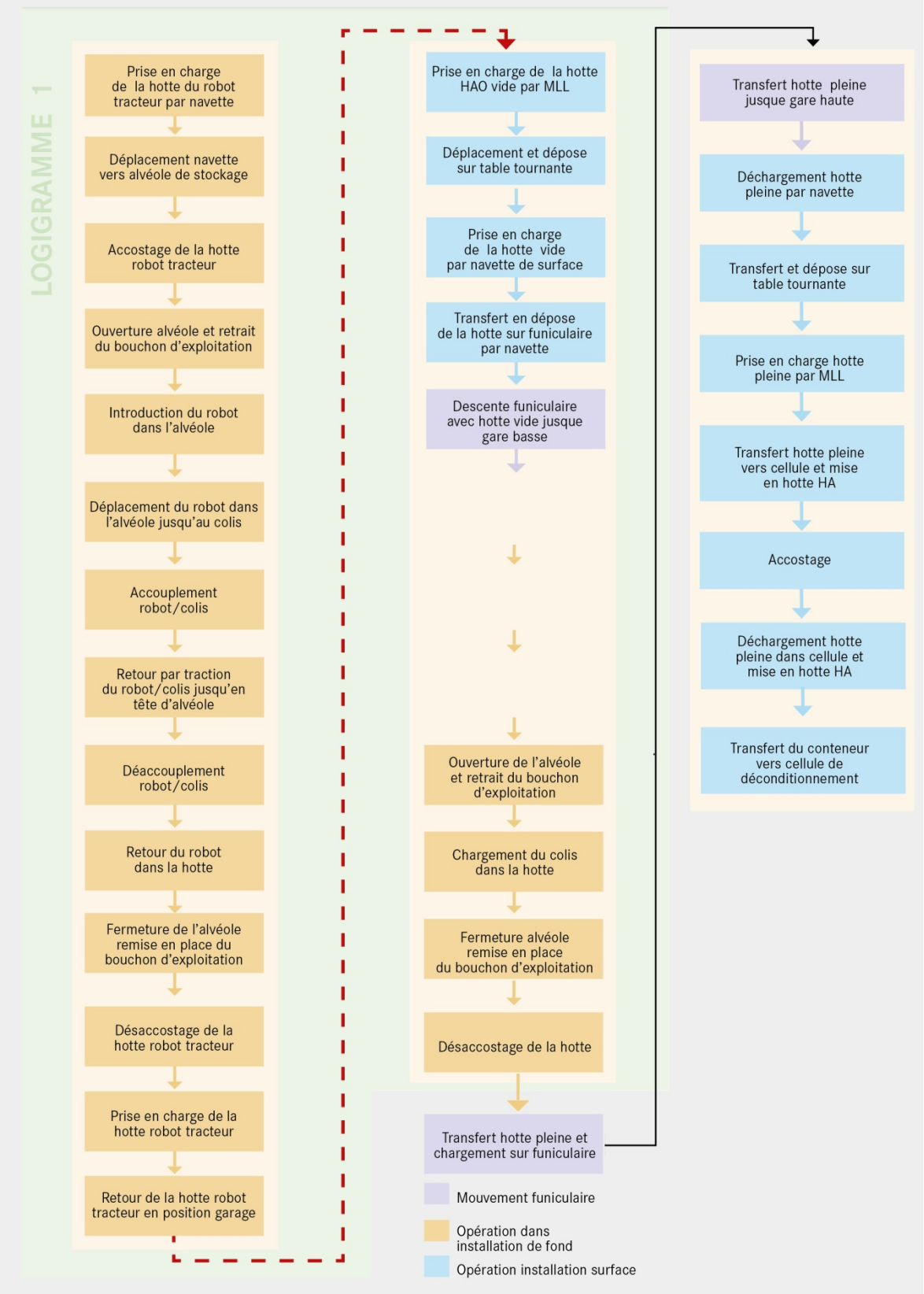


Figure 4-3 *Logigramme de retrait d'un colis de stockage HA0 (sur la base des études d'APS)*

4.2.3 Retrait de colis transférés dans un autre alvéole

4.2.3.1 Colis MA-VL

Ce scénario décrit le retrait de colis de stockage MA-VL d'un alvéole et leur transfert dans un second alvéole.

Comme pour tous les scénarios d'exploitation, tous les équipements de manutention et de surveillance nécessaires sont opérationnels ; il n'est pas nécessaire de prévoir une phase de remise à niveau des équipements ou une phase d'essai.

Les colis de stockage sont directement[31] accessibles et ne présentent pas de détérioration qui risquerait de remettre en cause leur préhension et leur transfert par les différents équipements de manutention. Ils ne sont pas contaminés et il n'y a donc pas de contrôle avant leur mise en hotte au niveau de l'alvéole et leur transfert vers le second alvéole. Les vitesses et hauteurs de manutention sont équivalentes à celles de la mise en stockage. Les opérations élémentaires du scénario sont identifiées dans le logigramme en Figure 4-4 ci-après.

L'étude de ce scénario n'a pas identifié d'opérations non couvertes par les dispositions de sûreté mises en œuvre pour la mise en stockage. Elle confirme que, par rapport aux opérations de mise en place des colis, ce scénario peut être mis en œuvre sans ajout de dispositions complémentaires.

Tous les systèmes de manutention entrant dans le cycle de retrait du colis de stockage sont ceux qui sont utilisés pour la mise en stockage.

La première étape du scénario consiste à descendre une hotte vide dans l'installation souterraine et à la transférer à proximité de l'alvéole concerné :

- 30 min pour la prise en charge de la hotte vide en surface jusqu'à son chargement sur le funiculaire ;
- 30 min pour la descente de la hotte vide par le funiculaire ;
- de 10 à 20 min (fonction de la position de l'alvéole) pour la prise en charge de la hotte vide par le chariot de fond au niveau de la gare basse jusqu'à son transfert à l'intersection de la galerie donnant accès à l'alvéole.

L'estimation du temps de cycle de ce scénario est déterminée sur la base des temps des étapes élémentaires suivantes :

- 30 min pour la prise en charge de la hotte vide par la navette de fond au niveau de l'intersection et son transfert jusqu'au poste d'accostage/désaccostage ;
- 20 min pour le chargement du colis de stockage à évacuer par le pont stockeur dans l'alvéole et son chargement dans la hotte vide ;
- 30 min pour le transfert de la hotte pleine par la navette vers l'alvéole de stockage et l'accostage/désaccostage de la hotte à la façade MA-VL pour le déchargement du colis de stockage ;
- 20 min pour le déchargement du colis de stockage par le pont stockeur dans l'alvéole. Cette opération est faite en parallèle de la séquence d'accostage/désaccostage de la hotte pleine et intervient à partir de 16 min du début de cette séquence.

Le temps moyen de cycle de retrait d'un colis de stockage MA-VL et son introduction dans l'alvéole de destination est de l'ordre de 100 min. Ces étapes sont répétées autant que nécessaire. La hotte est donc totalement dédiée à ces opérations.

Une étude complémentaire devra être faite en APD pour déterminer le taux d'utilisation des équipements de manutention et vérifier la mutualisation avec le maintien des opérations de stockage. En première approche, pour une exploitation en 2x8 ou 3x8, il apparaît que ce scénario peut être mis en œuvre de façon nocturne ou les week-ends de manière à perturber au minimum les flux de mise en stockage.

[31] C'est-à-dire sans nécessité d'en déplacer d'autres pour permettre le retrait des colis de stockage considérés.

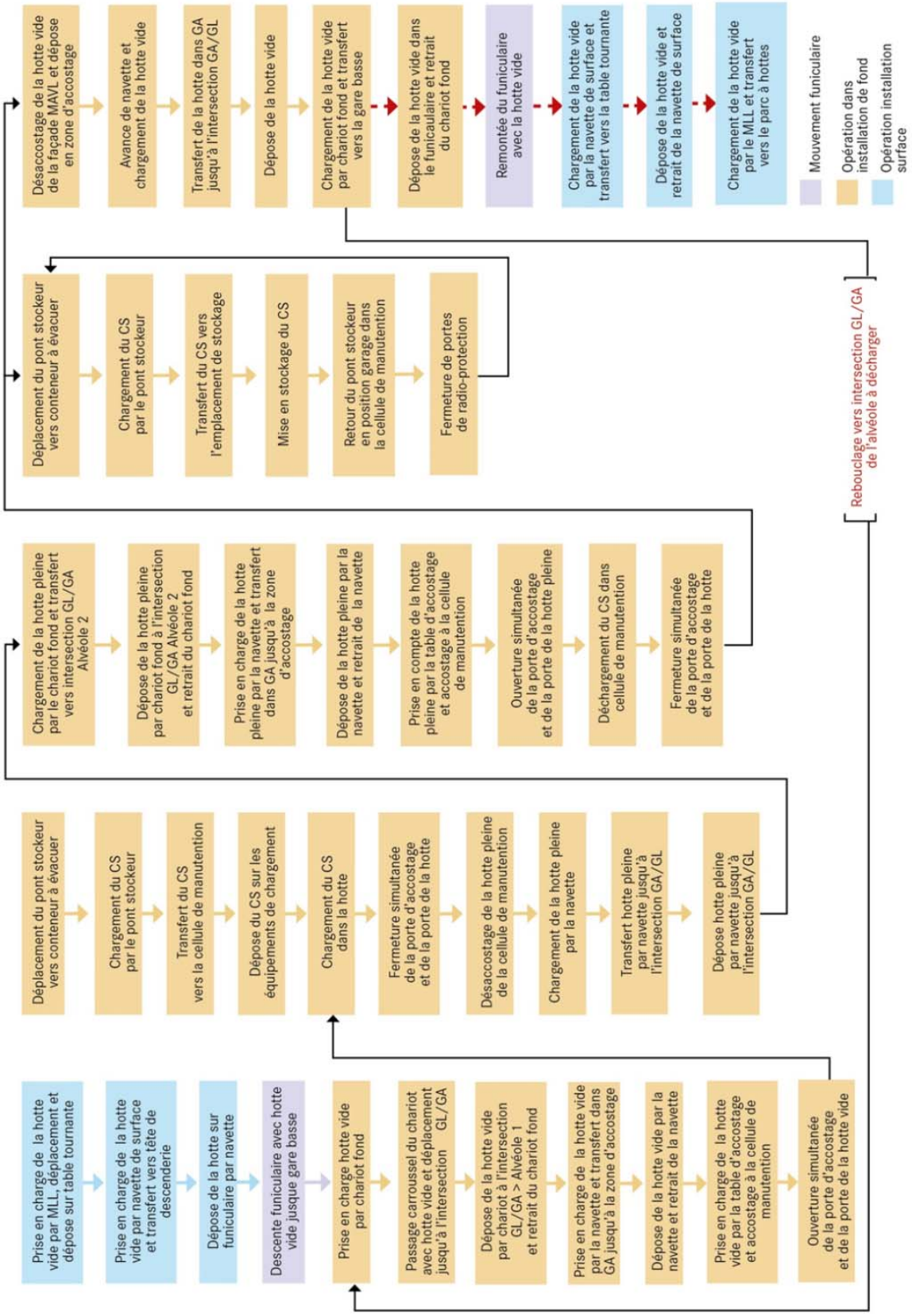


Figure 4-4 Logigramme de retrait d'un conteneur MA-VL vers autre alvéole (sur la base des études d'APS)

4.2.3.2 Colis HA0

Ce scénario décrit le retrait de colis de stockage HA0 d'un alvéole et leur transfert dans un second alvéole.

Comme pour tous les scénarios d'exploitation, tous les équipements de manutention et de surveillance nécessaires sont opérationnels ; il n'est pas nécessaire de prévoir une phase de remise à niveau des équipements, puis une phase d'essai.

Les colis de stockage sont considérés comme directement accessibles[32] et ne présentent pas de détérioration qui risquerait de remettre en cause leur préhension et leur transfert par les différents équipements de manutention. Les colis de stockage déplacés ne sont pas contaminés.

Par rapport à la mise en stockage, la température de la tête d'alvéole et du colis de stockage sont supérieures à celles de la mise en stockage en raison de la montée en température attendue de l'alvéole rempli. Toutefois, les équipements sont dimensionnés pour fonctionner dans une large gamme de températures couvrant cette situation. Les opérations élémentaires du scénario sont identifiées dans le logigramme en Figure 4-5 ci-après.

L'étude de ce scénario n'a pas identifié d'opérations non couvertes par les dispositions de sûreté mises en œuvre pour la mise en stockage. Elle confirme que, par rapport aux opérations de mise en place des colis, ce scénario peut être mis en œuvre sans ajout de dispositions complémentaires.

Tous les systèmes de manutention entrant dans le cycle de retrait du colis de stockage sont ceux utilisés pour la mise en stockage, à l'exception du robot-tracteur et de sa hotte dédiée.

La première étape consiste à descendre une hotte dans l'installation souterraine :

- 30 min pour la prise en charge de la hotte vide en surface par le MLL jusqu'à son chargement sur le funiculaire ;
- 30 min pour la descente de la hotte vide par le funiculaire ;
- de 10 à 20 min (fonction de la position de l'alvéole) pour la prise en charge de la hotte vide par le chariot de fond au niveau de la gare basse jusqu'à son transfert jusqu'au quartier HA0 ;
- 10 min pour la prise en charge de la hotte du robot tracteur, le transfert et l'accostage en tête d'alvéole et le retrait du bouchon de radioprotection d'exploitation.

L'estimation du temps de cycle de ce scénario est déterminée sur la base des temps des étapes élémentaires suivantes :

- 50 min au maximum pour le déplacement du robot tracteur dans l'alvéole jusqu'au colis et pour son retour en tête d'alvéole avec le colis de stockage ;
- 10 min pour le retour robot tracteur dans la hotte dédiée, désaccostage et remise en place du bouchon de radioprotection d'exploitation puis déplacement de la hotte vers la zone de garage ;
- 10 min pour la prise en charge de la hotte de transfert vide par navette à l'entrée du quartier HA0, déplacement de navette et de la hotte vide vers l'alvéole, accostage, ouverture de l'alvéole et retrait du bouchon de radioprotection d'exploitation ;
- 20 min pour le chargement du colis de stockage dans la hotte, fermeture de l'alvéole, remise en place du bouchon de radioprotection d'exploitation, désaccostage et transfert de la hotte vers zone de garage par navette ;
- 3 min pour le déplacement de la navette et de la hotte pleine vers un second alvéole, accostage, ouverture de l'alvéole et retrait du bouchon de radioprotection d'exploitation ;
- 17 min pour l'introduction du colis de stockage en tête d'alvéole, fermeture de l'alvéole, mise en place du bouchon de radioprotection d'exploitation et désaccostage de la hotte vide puis déplacement navette et de la hotte vers la zone de garage ;
- 10 min pour la prise en charge de la hotte du robot pousseur en zone de garage, le transfert et l'accostage en tête d'alvéole et le retrait du bouchon de radioprotection d'exploitation ;

[32] C'est-à-dire sans nécessité d'en déplacer d'autres pour permettre le retrait des colis de stockage considérés.

- 50 min pour l'introduction du robot pousseur en tête d'alvéole, déplacement du robot pousseur dans l'alvéole pour le stockage du colis et retour en tête d'alvéole du robot ;
- 10 min pour le retour du robot pousseur dans la hotte dédiée, désaccostage et remise en place du bouchon de radioprotection d'exploitation puis déplacement de la hotte vers la zone de garage.

La durée totale pour le retrait d'un colis de stockage et l'introduction dans un second alvéole est de l'ordre de 180 min pour la distance maximale à parcourir dans l'alvéole, soit environ 80 m. Ces opérations devront être renouvelées en fonction du nombre de colis à récupérer pour le stockage dans un autre alvéole.

La durée de ce cycle initial ne permet pas de mutualiser les équipements de manutention avec d'autres opérations de stockage. Comme pour le scénario de retrait d'exploitation incluant une remontée en surface du colis de stockage (cf § 4.2.2.2), il sera donc nécessaire d'arrêter les opérations de mise en stockage d'autres colis HA0. En phase d'APD, des études seront faites pour simuler ces différentes étapes et optimiser la durée de ce cycle et le taux d'occupation des équipements.

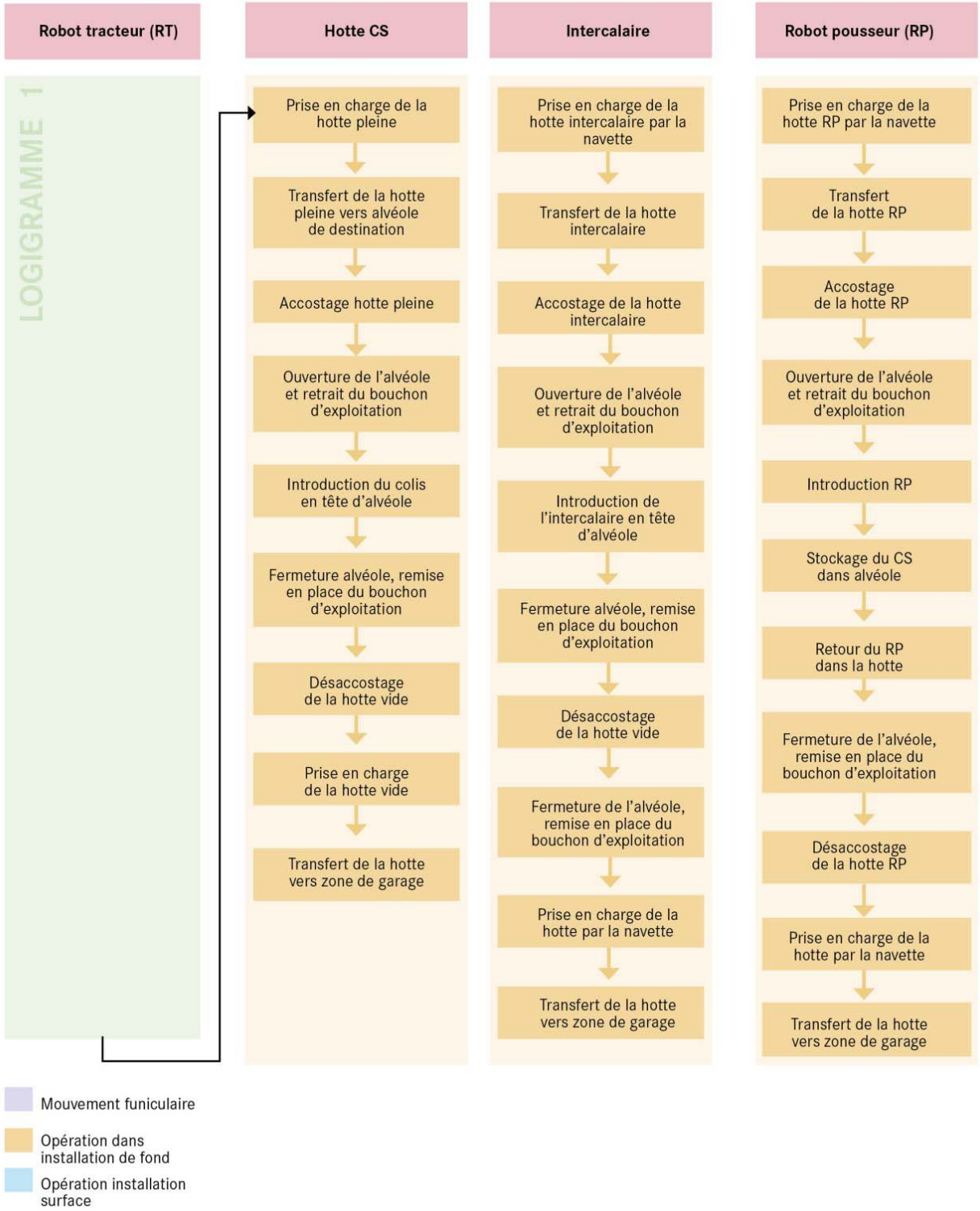


Figure 4-5 *Logigramme de retrait d'un conteneur HA-VL d'un alvéole et transfert vers un autre alvéole (sur la base des études d'APS)*

4.3 Scénario hypothétiques

4.3.1 Retrait de colis MA-VL contaminés

Les colis de stockage MA-VL introduits dans l'alvéole lors du stockage ne sont pas contaminés.

Une fois stockés, les colis ne sont plus sollicités en situation normale et les conditions d'ambiance qui prévalent dans les alvéoles sur toute la période d'exploitation de Cigéo (absence d'eau liquide, faible amplitude de variation des températures, absence de gel, absence d'atmosphère corrosive…), quel que soit leur niveau de fermeture, ne sont pas préjudiciables au maintien des propriétés de confinement des colis de stockage et notamment de la première barrière de confinement que représentent les colis primaires (6). Lors d'une opération de retrait, les colis de stockage sont donc *a priori* non contaminés. Toutefois, à titre de précaution, l'Andra a procédé à une étude préliminaire d'un scénario hypothétique de retrait d'un colis contaminé afin d'évaluer la capacité de l'installation à répondre à une telle situation.

En préalable à l'engagement de l'opération de retrait, un robot de contrôle de la contamination des colis de stockage est installé dans la cellule de manutention, ainsi qu'un robot de fixation de la contamination.[33] Leur fonctionnement est vérifié par des essais avant leur mise en service. Le cas échéant, les équipements de manutention pourraient être protégés, par exemple par du vinyle, afin de limiter leur éventuelle contamination. Les infrastructures de la cellule de manutention pourraient également, en fonction des niveaux de contamination éventuellement atteints, bénéficier d'une protection provisoire par du vinyle afin de préserver leur propreté radiologique. Cette cellule pourrait aussi faire l'objet d'opérations de décontamination entre les cycles d'opérations de retrait.

Chaque colis retiré fait l'objet d'un frotti par le robot de contrôle de non-contamination. En cas de frotti positif, le colis de stockage est pris en charge par le second robot pour fixation de cette contamination. Ce procédé ne modifie pas significativement l'encombrement du colis de stockage et il ne gêne pas sa manutention. Ces opérations de contrôle et de fixation de la contamination sont répétées jusqu'à ce que le niveau de contamination labile soit considéré comme suffisamment réduit pour le transfert du colis en surface.

Chaque colis de stockage à retirer est alors introduit dans la hotte confinante utilisée pour la mise en stockage (ou une hotte équivalente). Il n'est pas nécessaire d'utiliser une hotte spécifique pour mettre en œuvre ce scénario. Son transfert vers la cellule de décontamination ne nécessite pas de précaution particulière. La fixation de la contamination du colis participe au maintien de la propreté radiologique de la hotte et des locaux de l'installation de surface.

L'étude préliminaire de ce scénario montre que, sous réserve de la mise en place d'équipements spécifiques de contrôle et de fixation de la contamination, un colis contaminé pourrait être retiré d'un alvéole MA-VL et remonté en surface. Toutefois, les temps opératoires seraient plus longs que pour un colis non contaminé en raison de la durée des opérations de contrôle et de fixation de la contamination réalisées dans la cellule de manutention (de l'ordre de quelques heures au maximum). Les temps opératoires des autres opérations sont identiques (transfert dans les galeries, remontée dans la descenderie par le funiculaire…).

4.3.2 Non poursuite du projet Cigéo à l'issue de la phase pilote

La durée de la phase pilote prévue actuellement dans la proposition de PDE (5) correspond à environ 10 ans. Elle comprend, après la mise en service de Cigéo prévue vers 2030, une période de montée en puissance de l'installation sur environ 6 ans. Pour passage en exploitation courante, l'Andra transmettra un bilan de l'exploitation de Cigéo, en particulier des conditions de retrait des colis.

[33] Le procédé pour fixer la contamination du colis de stockage n'a pas encore été choisi à ce stade. Son étude sera poursuivie en APD.

Conformément au déroulement de référence présenté dans la proposition de PDE, à l'issue de la phase pilote, c'est-à-dire à l'horizon 2035, l'installation souterraine sera dans la situation suivante :

- 4 alvéoles MA-VL auront été mis en service et seront en cours de remplissage. Environ 4 600 colis MA-VL y auront été stockés ;
- un premier quartier HA0 aura été construit, au maximum, 1 400 colis HA0 y auront été stockés.[34]

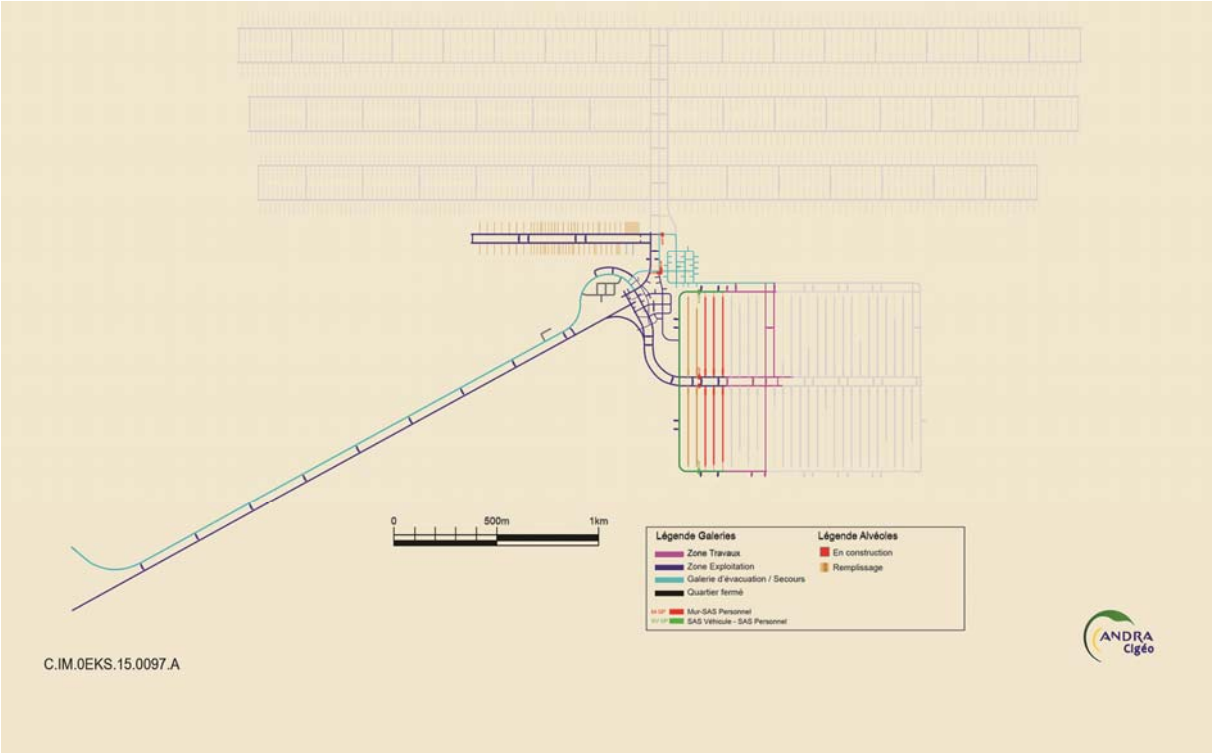


Figure 4-6 Cigéo à l'horizon 2035 (sur la base des études d'APS)

A l'horizon 2035, les 4 alvéoles MA-VL en cours de chargement sont opérationnels depuis 5 ans. Aucune opération de démontage d'équipement de manutention n'a été réalisée, ni aucune opération de fermeture. Les installations de surface permettent la réexpédition de colis à l'extérieur de Cigéo vers la filière de gestion alternative choisie.

Aucune disposition de sûreté complémentaire à celles prises pour la mise en stockage des colis n'est requise pour le retrait. L'installation est dans un niveau maximal de récupérabilité.

Si la décision de ne pas poursuivre Cigéo était prise à l'issue de la phase industrielle pilote et que tous les colis devaient en être retirés, les opérations pourraient techniquement commencer rapidement. Toutes les installations de Cigéo pouvant être mobilisées pour le retrait, il pourrait s'effectuer à un rythme équivalent au rythme de mise en place des colis atteint en 2035, à la fin de la montée en puissance de l'exploitation.

La durée totale nécessaire pour le retrait de tous les colis stockés pendant la phase industrielle pilote serait inférieure à la durée de leur mise en place. Il est estimé que la durée nécessaire serait d'environ 3 ans.

[34] Une optimisation à l'étude pourrait réduire le nombre d'alvéoles HA0 construites en tranche 1.

4.3.3 Retrait complet et réexpédition de tous les colis d'un alvéole MA-VL

Dans la proposition de PDE (5), les premières opérations de fermeture d'alvéoles MA-VL sont engagées à l'horizon 2100. Si, avant cette date, il était décidé de retirer une famille de colis MA-VL stockée dans Cigéo, la durée des opérations de retrait dépendrait des deux principaux facteurs suivants :

- le nombre de colis de stockage de la famille et donc le nombre d'alvéole MA-VL à vider ;
- la décision, soit d'interrompre la réception des colis pour consacrer l'exploitation de Cigéo uniquement au retrait, soit de retirer ces colis MA-VL tout en continuant les opérations de réception et de mise en stockage d'autres familles de colis sur le rythme prévu initialement.

En première approche, pour estimer globalement le temps nécessaire au retrait de tous les colis de stockage d'une famille de colis MA-VL, il serait nécessaire de multiplier le temps de retrait de tous les alvéoles d'un alvéole par le nombre d'alvéole dédiés. A ce stade des études, aucune famille n'a été particulièrement identifiée pour ce scénario.

Les équipements de manutention étant, après remplissage de l'alvéole, soit démontés pour réutilisation, soit mis sous cocon, les premières opérations à effectuer avant de pouvoir retirer les colis, consistent à remettre en service ces équipements de manutention. Si les équipements mis sous cocon sont obsolètes (en fonction de la date de l'opération), ils sont démontés et remplacés. La durée de ces opérations est variable. Il est estimé, à ce stade des études, que la durée nécessaire pour le rééquipement de la cellule de manutention et la remise en service d'un pont stockeur pourrait varier entre 6 mois (cas d'une réutilisation des équipements mis sous cocon) et 1 an (cas où un remontage complet est nécessaire).

Une fois l'alvéole rééquipé, les opérations de retrait peuvent commencer.

Dans le cas où la mise en stockage d'autres familles de colis serait maintenue, les opérations de retrait seraient effectuées dans le temps disponible entre les opérations de mise en stockage, c'est-à-dire la nuit ou les week-ends pour une exploitation en 2x8. Le retrait de tous les colis de stockage de l'alvéole MA-VL présentant la plus grande capacité de stockage (environ 5 000 colis) serait réalisé en environ 16 mois. Les installations de surface de Cigéo devraient être modifiées pour permettre la réexpédition des colis. La construction d'entreposages temporaires (tampon) serait notamment nécessaire pour gérer les flux. D'éventuelles cellules de préparation complémentaires pourraient également être ajoutées sur les emprises laissées disponibles à titre conservatoire.

Dans le cas où la réception et la mise en stockage d'autres familles de colis de déchets serait interrompue, le retrait pourrait s'effectuer sur une durée plus courte. Cette durée serait d'environ 12 mois pour l'alvéole MA-VL contenant le plus de colis. Les installations de surface n'auraient pas à être modifiées significativement pour permettre la réexpédition des colis hors de Cigéo.

4.3.4 Retrait complet et réexpédition de toutes les familles HA0

Dans la proposition de PDE (5), les premières opérations de fermeture d'alvéoles HA0 sont engagées à l'horizon 2070. Si, avant cette date, il était décidé de retirer les colis HA0 stockés dans Cigéo et de les réexpédier, les premières opérations à effectuer seraient la remise en service des équipements de manutention des quartiers HA0. En effet, ceux-ci sont, comme ceux des cellules de manutention des alvéoles MA-VL, soit démontés, soit mis sous cocon à l'issue du remplissage du quartier HA0. Cette durée est égale à environ 1 an.

La durée des opérations de retrait serait d'environ 10 ans.[35] La durée totale de l'opération serait donc d'environ 11 années.

Si la corrosion des alvéoles HA0 nécessite des opérations de remise en conformité (brossage, retrait de la rouille…) pour le bon fonctionnement du robot, un temps significatif sera à ajouter aux opérations ; les temps opératoires nécessaires au retrait des colis de stockage des alvéoles en seraient *a minima* doublés.

[35] En fonction du nombre d'alvéoles HA0 construits.

Contrairement aux colis MA-VL, la durée de retrait dépend peu du maintien ou de l'arrêt des opérations de mise en stockage. En effet, les activités dans les quartiers HA0 génèrent peu de co-activité avec les activités de mise en stockage de colis MA-VL.

Dans le cas où des emballages de transport capables d'accueillir les colis de stockage HA0 seraient disponibles, aucune opération de déconditionnement et d'extraction du colis primaire HA0 n'est nécessaire avant expédition. Aucune nouvelle fonction ne serait à ajouter à Cigéo.

Si les colis HA0 doivent être extraits de leur colis de stockage avant expédition, des telles opérations pourraient être entreprises dans la cellule de déconditionnement existante. En fonction du rythme de déconditionnement choisi, des cellules complémentaires pourraient être construites en surface sur les emprises laissées disponibles à titre conservatoire. Un temps supplémentaire pour la réalisation de ces opérations serait à prévoir. Il ne devrait toutefois pas modifier de façon significative la durée de l'ordre de la dizaine d'années estimée à ce stade.

4.3.5 Ouverture des galeries et des alvéoles scellés, retrait et réexpédition d'une famille MA-VL

Dans la proposition de PDE (5), les premières opérations de fermeture d'alvéoles MA-VL sont engagées vers 2100. Si, après cette date (et avant la fermeture définitive de Cigéo à l'horizon 2150), il était décidé de retirer une famille de colis MA-VL stockée dans Cigéo, des opérations lourdes de déblaiement et de réouverture devraient être engagées ; la réception et la mise en stockage des colis HA devrait être interrompue et l'exploitation de Cigéo ne pourrait être consacrée qu'au retrait.

La durée des opérations de déblaiement, de remise en service du quartier MA-VL (ventilation, équipement de manutention…) est d'un ordre comparable, voire supérieur, à la durée de construction du quartier MA-VL en T1 soit de l'ordre de 6 années. De nouvelles installations en surface devraient être construites pour la réexpédition des colis MA-VL.

Les opérations de réouverture des alvéoles concernées nécessiteraient environ 1 an par alvéole. Il serait nécessaire de prévoir une phase d'inspection pour réaliser un état des lieux précis de l'environnement et des conditions opératoires à proximité et dans l'alvéole. En fonction de l'état de l'alvéole, son rééquipement et sa remise en service durerait entre 1 et 2 années.

Une fois remise en service, la durée des opérations pour vider l'alvéole et réexpédier les colis est comparable à celle nécessaire pour vider un alvéole non fermé. Pour une famille de colis MA-VL, la durée totale de l'opération s'élèverait à environ 10 années.

4.3.6 Ouverture des galeries et des alvéoles scellés de toutes les familles de colis HA0, retrait complet et réexpédition

Dans la proposition de PDE (5), les premières opérations de fermeture d'alvéoles HA0 sont engagées à l'horizon 2070. Si, après cette date (et avant la fermeture définitive de Cigéo à l'horizon 2150), il était décidé de retirer les colis HA0 stockés dans Cigéo, des opérations lourdes de déblaiement et de réouverture devraient être engagées ; la réception et la mise en stockage des colis MA-VL et HA1/HA2 devrait être interrompue et l'exploitation de Cigéo ne serait consacrée qu'au retrait.

A ce stade, il est estimé que la durée de remise en service des quartiers HA0 nécessiterait environ 5 années. Une fois remis en service, la durée des opérations de retrait et de réexpédition est comparable à celle nécessaire pour vider le quartier non fermé.[36] Au total, la durée de l'opération serait d'environ 15 années.

[36] Ces durées sont fonction du nombre d'alvéoles HA0 construits.

ANNEXES

Annexe 1 : Phasage général des essais préalables à la mise en service de Cigéo

A l'issue des études de conception, préalablement à leur montage dans Cigéo, des essais sur les équipements sont menés chez les différents fournisseurs. Ces premiers tests ont pour objet de soumettre les équipements à des conditions d'environnement les plus représentatives et d'anticiper les problèmes potentiels d'interfaces avec d'autres fournitures. A l'issue de ces essais, dits de « phase 0 », le matériel est réceptionné en vue de son installation sur Cigéo. Ces essais permettent de valider les fonctions de base de retrait de colis, notamment les interfaces de manutention spécifiques.

La méthode d'essais de démarrage de l'installation procède par intégration successive des équipements en respectant une progression depuis les essais de l'équipement ou de la machine élémentaire, puis de l'ensemble fonctionnel, puis de l'installation dans sa globalité.

Dans Cigéo, l'intégration progressive des conditions de fonctionnement se décline de la façon suivante :

- essais dits de « phase 1 » : vérification hors tension du bon montage de l'équipement et contrôle réglementaire avant mise sous tension réalisée par le fournisseur ;
- essais dits de « phase 2 » :
  - ✓ contrôles préliminaires et essais à blanc des fonctions élémentaires du procédé (essais élémentaires des équipements après mise sous tension) ;
  - ✓ essais des ensembles fonctionnels par la mise en œuvre des fonctions élémentaires (par exemple essais des fonctionnalités du pont dans l'environnement de la cellule) ; vérification des performances des ensembles fonctionnels en mode normal automatique et en mode dégradé (essais de sûreté) ;
  - ✓ Intégration de tous les ensembles fonctionnels pour valider leur fonctionnement simultané en marche normale et dégradée (affalage des charges en cas de dysfonctionnement d'un pont). Vérification de l'aptitude à l'exploitation (validation des modes opératoires) et tests des réactions aux incidents généraux (RIG) ; vérification de la prise en compte des facteurs organisationnels et humains et essais de maintenance ;
- Essais dits de « phase 3 » : Préparation à la mise en actif et essais avec des colis actifs ; validation des modes opératoires, contrôles de sûreté.

En simultané de ces essais fonctionnels, l'intégration de la conduite du procédé se fait du mode manuel au mode automatique. Le phasage global des essais est présenté sur la Figure ci-après.

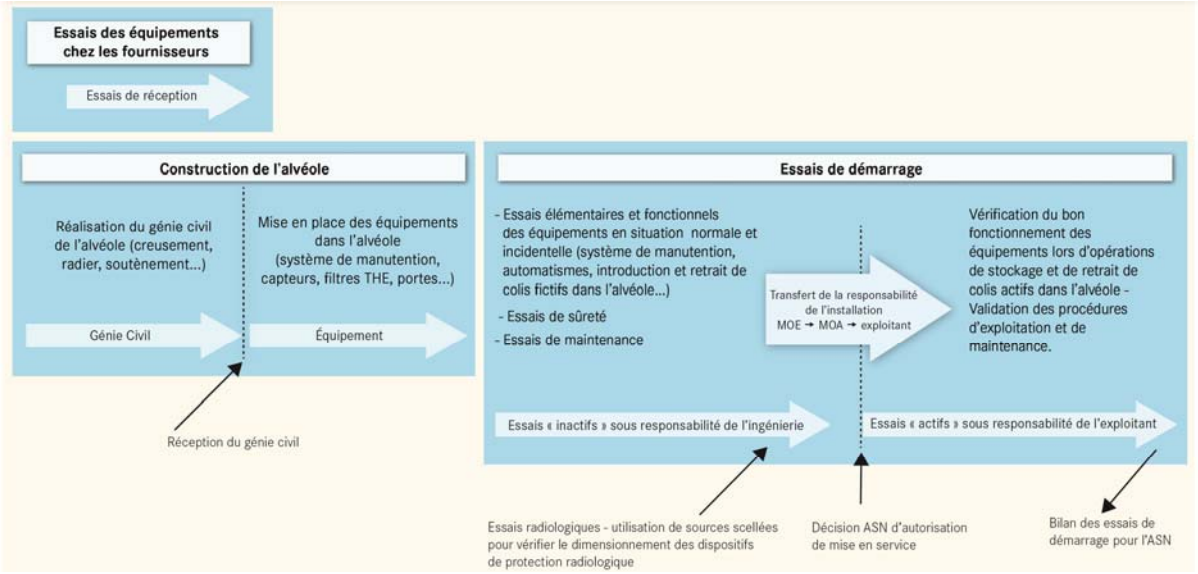


Figure 4-7 Schéma du phasage global des opérations pour le démarrage de Cigéo

Annexe 2 : Séquences d'opérations testées pour le retrait de colis

Étapes élémentaires

Pour un colis MA-VL

1. Prise en charge d'une hotte vide au point de chargement des hottes par chariot de transfert fond ;
2. transfert de la hotte vide vers l'intersection de la galerie d'accès MA-VL et dépose de la hotte vide ;
3. prise en charge de la hotte vide par navette MA-VL à l'intersection et transfert vers alvéole de stockage ;
4. dépose de la hotte pour accostage sur la cellule de manutention ;
5. accostage de la hotte ;
6. prise en charge du colis à récupérer par le pont stockeur dans la cellule l'alvéole ;
7. transfert du colis par pont stockeur dans la cellule de manutention vers la hotte ;
8. mise en place du colis récupéré dans la hotte ;
9. prise en charge de la hotte avec colis après désaccostage par navette MA-VL et transfert vers intersection galerie d'accès ;
10. prise en charge de la hotte par chariot et transfert vers point de chargement des hottes en attente du funiculaire ;
11. prise en charge de la hotte par chariot et dépose sur funiculaire ;
12. remontée du funiculaire avec hotte pleine ;
13. prise en charge de la hotte par navette de transfert et transport vers machine de levage limité (MLL) ;
14. prise en charge de hotte par MLL et transfert vers cellule de reconditionnement.

Pour un colis HA0

1. Prise en charge de la hotte robot tracteur par une navette et transfert vers alvéole de stockage pour accostage ;
2. ouverture de l'alvéole et progression du robot jusqu'au colis, accouplement au colis pour retour en tête d'alvéole, désaccouplement du robot tracteur ;
3. retour du robot dans la hotte robot tracteur et fermeture de l'alvéole ;
4. désaccostage de la hotte robot tracteur et décalage par navette ;
5. prise en charge d'une hotte de transfert vide au point de chargement des hottes par chariot de transfert ;
6. transfert de la hotte de transfert vide vers l'intersection de la galerie et dépose de la hotte vide ;
7. prise en charge de la hotte de transfert vide HA0 par navette à l'intersection et transfert vers alvéole de stockage ;
8. accostage de la hotte de transfert en tête d'alvéole, ouverture et retrait du colis HA0 de l'alvéole (introduction du colis dans la hotte) – fermeture de l'alvéole ;
9. désaccostage de la hotte contenant le colis et transfert par la navette jusqu'à l'intersection de la galerie ;
10. prise en charge de la hotte de transfert contenant le colis de stockage par le chariot et transfert vers le point de chargement en attente du funiculaire ;
11. prise en charge de la hotte de transfert par le funiculaire et remontée de la hotte au niveau de la tête de descenderie ;
12. accostage de la hotte de transfert sur la navette et transfert vers la cellule de déchargement et de basculement du colis HA0 pour remise à la verticale ;
13. désaccostage de la hotte vide et transfert vers la zone de stockage par un équipement de manutention spécifique (moyen de levage limité).

En aval de ces essais fonctionnels, il est nécessaire de tester toutes les fonctions de sûreté liées à la manutention de colis MA-VL et HA0. Les essais destinés à vérifier la conformité des écrans radiologiques et les dispositions de radioprotection ont été réalisés avant les essais de retrait.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Débat public Cigéo. Projet de centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse / Haute Marne (Cigéo), 15 mai -15 décembre 2013, Compte-rendu. Commision nationale du débat public (CNDP). (2014).

2 Bilan du débat public, Projet de centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse / Haute-Marne (Cigéo), 15 mai - 15 décembre 2013, dressé par le Président de la Commission nationale du débat public. Commission Nationale du Débat Public (CNDP). (2014). 20 p.

3 Débat public Cigéo. Conférence de citoyens. Présentation de l'avis du panel de citoyens. Commission Nationale du débat public (CNDP). (2014). 36 p.

4 Délibération du conseil d'administration de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs du 5 mai 2014 relative aux suites à donner au débat public sur le projet Cigéo. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2014). Journal Officiel. Lois et décrets, n°108, pp.7851-7854.

5 Proposition de plan directeur pour l'exploitation (PDE). Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOASDR0000150063.

6 Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (DOS-Expl). Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOASR10000150060.

7 Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture (DOS-AF). Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOASR20000150062.

8 Loi n° 2006-739 du 28 Juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. (2006). Journal Officiel. Lois et Décrets, n°93, pp.9721.

9 Directive n° 2011/70/EURATOM du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs. Conseil de l'Union Européenne (2011). Journal officiel de l'Union européenne, n°L199, pp.48-56.

10 Stockage définitif des déchets radioactifs. IAEA. (2011). Collection normes de sûreté de l'AIEA n°SSR 5. n° STI/PUB/1449. 92 p.

11 Note de positionnement sur la réversibilité. Décembre 2015. ANDRA. (2016). Brochure n°577. Note n° DICOD/15-0247. 28 p.

12 Adaptabilité de Cigéo au stockage direct de combustibles. Andra. (2015). Rapport n° CRPADPG150013/A.

13 Décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ministère de l'Écologie, du dévelôppement durable et de l'Énergie (2013). Journal officiel de la République Française, n°304, pp.22347.

14 Réversibilité des décisions et récupérabilité des déchets radioactifs. Éléments de réflexion pour les programmes nationaux de stockage géologique. Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire. (2012). Gestion des déchets radioactifs. n° AEN 7105. 33 p.

15 Propositions de l'Andra relatives à la réversibilité du projet Cigéo. Andra. ANDRA. (2012). Les rapports n°499. Rapport n° DCOM/12-0287. 32 p.

16 Projet Cigéo : Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse / Haute Marne. Le dossier du maître d'ouvrage. Débat public du 15 Mai au 15 Octobre 2013. Andra. ANDRA. (2013). Les rapports n°504. Rapport n° DCOM/13-0028. 104 p.

17 Spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo. Andra. (2016). Spécifications n° CGTEDSPEAMOASR07000160005.

18 Esquisse de la notice des capacités techniques de l'exploitant. Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOASYN0000150064.

19 Adaptabilité de Cigéo pour le stockage des déchets en "réserves". Andra. (2015). Note technique n° CGNTADPG150006.

20 Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'oeuvre privée. (2010). Journal Officiel Version consolidée au 9 décembre 2010, n°24/11/2010,

21 Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. (2005). NF EN 1992-1-1.

22 Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Etat de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base des indicateurs de durabilité. (2004). Association Française de Génie Civil, Documents scientifiques et techniques. 252 p.

23 Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206. (2014). NF EN 206.

24 Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H2S Environments. (2005). NACE International. ANSI/NACE TM 0177.

25 Arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. Version consolidée au 05 juillet 2013. (2012).

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

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

www.andra.fr