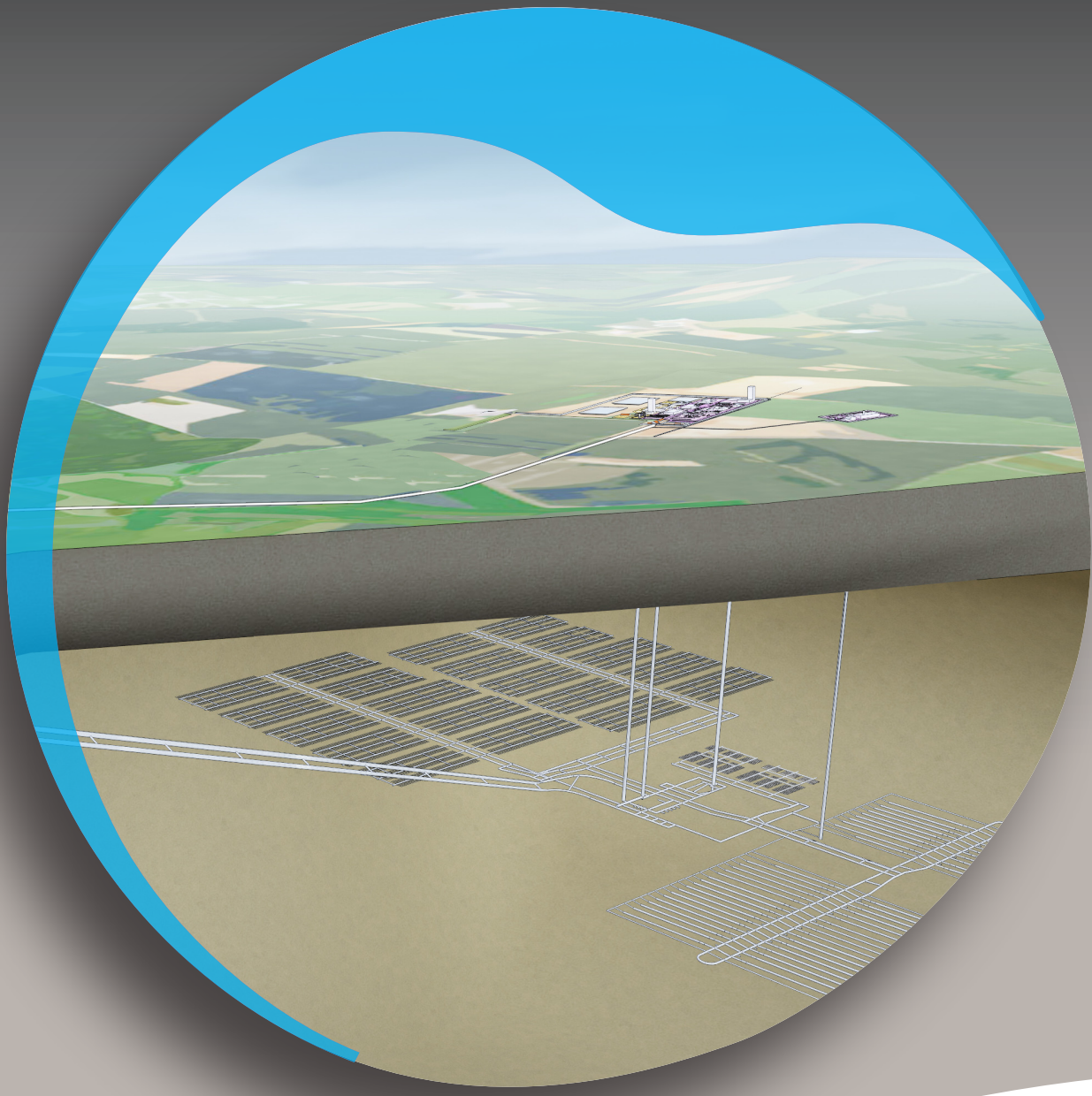
Stockage réversible profond

ÉTAPE 2009

OPTIONS DE CONCEPTION DU STOCKAGE EN FORMATION GÉOLOGIQUE PROFONDE



ANDRA
La maîtrise des déchets radioactifs

Options de conception du stockage en formation géologique profonde

SOMMAIRE

Tables des illustrations 6

1. Introduction, démarche d'étude 9

1.1 Contexte et objet 10
1.2 L'étape 2009 des études et recherches 11
1.3 Les recherches technologiques et les études d'ingénierie sur le stockage réalisées de 2006 à 2009 12
1.4 Introduction de la structure du rapport 13

2. Fonctionnalités et articulation d'ensemble des composants du stockage 15

2.1 Les fonctions de sûreté du stockage 16
2.2 La réversibilité du stockage 17
2.3 Les principaux composants d'un centre de stockage 19

3. Installations de surface 21

3.1 Objectifs fonctionnels 22
3.2 Options de conception 22
3.3 Les solutions présentées 23
3.3.1 Les installations industrielles associées à la zone « puits » 23
3.3.2 Les installations industrielles associées à la zone «descenderie» 25
3.3.3 Les autres installations 26

4. Architecture souterraine 27

4.1 Objectifs fonctionnels 28
4.1.1 Sécurité du travail et sûreté en exploitation 28
4.1.2 Sûreté après fermeture 28
4.1.3 Développement progressif du stockage 28
4.1.4 Prise en compte des caractéristiques des déchets 29
4.2 Options de conception 29
4.2.1 L'implantation du stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien 30
4.2.2 Les zones de stockage 30
4.2.3 Les ouvrages de liaison entre les installations de surface et les installations souterraines 32
4.2.4 Les infrastructures souterraines au niveau du stockage 32
4.2.5 La ventilation 33
4.2.6 Les ouvrages de fermeture 33
4.3 Les solutions présentées 33
4.3.1 Données d'entrée 33
4.3.2 Plan d'ensemble et principaux composants 34
4.3.3 La ventilation des installations souterraines 35
4.3.4 Le développement progressif du stockage 37
4.4 Essais technologiques au Laboratoire souterrain 40

5. Transfert des colis entre la surface et les alvéoles de stockage 41

5.1 Objectifs fonctionnels 42

5.2 Options de conception 42

5.3 Les solutions présentées 42

5.3.1 Transfert des hottes de la surface jusqu'au niveau du stockage 42

5.3.2 Transfert des hottes au niveau du stockage 46

6. Conteneur de stockage MAVL 51

6.1 Objectifs fonctionnels 52

6.2 Options de conception 52

6.2.1 Forme du conteneur de stockage 52

6.2.2 Matériau constitutif du conteneur de stockage 52

6.2.3 Dimensions et masse 53

6.2.4 Transfert depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage 53

6.2.5 Manutention et mise en place en alvéole 53

6.3 Les solutions présentées 53

6.3.1 Conception générique 53

6.3.2 Variantes de conception 54

6.4 Essais technologiques 55

7. Alvéole de stockage MAVL 57

7.1 Objectifs fonctionnels 58

7.2 Options de conception 58

7.3 Les solutions présentées 59

7.3.1 Description de l'alvéole 59

7.3.2 Construction de l'alvéole 61

7.3.3 Exploitation de l'alvéole 61

7.3.4 Scellement de l'alvéole 62

7.4 Essais technologiques 62

8. Manutention des colis MAVL dans les alvéoles de stockage 65

8.1 Objectifs fonctionnels 66

8.2 Options de conception 66

8.3 Les solutions présentées 66

8.3.1 Mise en place des colis après pré empilage 67

8.3.2 Mise en place individuelle des colis 69

8.3.3 Analyse des différentes solutions présentées 73

8.3.4 Retrait des colis de l'alvéole 74

8.4 Essais technologiques 75

9. Conteneur de stockage HA 77

9.1 Objectifs fonctionnels 78

9.2 Options de conception 78

9.2.1 Forme et dimensions du conteneur de stockage 78

9.2.2 Matériau constitutif du conteneur de stockage 78

9.2.3 Transfert depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage 78

9.2.4 Manutention et mise en place en alvéole 79

9.3 Les solutions présentées 79
9.4 Essais technologiques 80

10. Alvéole de stockage HA 83

10.1 Objectifs fonctionnels 84
10.2 Options de conception 84
10.3 Les solutions présentées 85
10.3.1 Description de l'alvéole 85
10.3.2 Construction de l'alvéole 86
10.3.3 Exploitation de l'alvéole 87
10.3.4 Obturation de l'alvéole 87
10.4 Essais technologiques 87

11. Manutention des colis HA dans les alvéoles de stockage 89

11.1 Objectifs fonctionnels 90
11.2 Options de conception 90
11.3 Les solutions présentées 90
11.3.1 Transfert et introduction des colis dans l'alvéole (ou extraction de l'alvéole) 91
11.3.2 Translation des colis dans l'alvéole 92
11.4 Essais technologiques 94
11.4.1 Essais d'introduction et d'extraction de colis par une chaîne pousseuse 94
11.4.2 Essais de mise en place et de retrait de colis par un robot 94

12. Les ouvrages de fermeture du stockage 97

12.1 Objectifs fonctionnels 98
12.2 Options de conception 98
12.2.1 Les scellements 98
12.2.2 Le remblai des ouvrages souterrains 98
12.3 Les solutions présentées 99
12.3.1 Description et mise en place de scellements en puits 99
12.3.2 Description et mise en place de scellements en galeries 102
12.3.3 Le remblai courant en galerie 104
12.4 Essais technologiques 105
12.4.1 Scellements en puits 105
12.4.2 Scellements en galeries 107
12.4.3 Remblayage en galerie 108

Annexes 109

Annexe 1 : Architecture correspondant au scénario de base du modèle d'inventaire 2009 110

Annexe 2 : Architecture correspondant au scénario de dimensionnement du modèle d'inventaire 2009 111

Références bibliographiques 113

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Espace technologique Andra (Saudron) avec démonstrateurs de conteneurs de stockage MAVL (à gauche) et démonstrateur de mise en place des colis HA (à droite)	12
Figure 2-1	Les choix de gestion possibles à chaque étape du processus de stockage	18
Figure 3-1	Exemple d'une architecture du stockage avec 2 zones d'implantation d'installations de surface	22
Figure 3-2	Exemple d'une zone « puits »	24
Figure 3-3	Exemple d'une zone « descenderie »	26
Figure 4-1	Exemple d'architecture d'une zone MAVL	30
Figure 4-2	Exemple d'architecture de la zone HA	32
Figure 4-3	Architecture souterraine (situation « à terminaison »).	34
Figure 4-4	Représentation schématique de la ventilation du stockage	36
Figure 4-5	Développement progressif de l'architecture souterraine du stockage	39
Figure 5-1	Véhicule de transfert des hottes HA en descenderie	43
Figure 5-2	Transfert des colis par véhicule dans la descenderie du SFR (SKB – Forsmark - Suède)	44
Figure 5-3	Principes de conception d'un funiculaire de transfert de hottes HA et MAVL	45
Figure 5-4	Funiculaire du plan incliné de Ronquière (Belgique)	46
Figure 5-5	Types d'aménagement envisageables aux carrefours des galeries de transfert (aiguillage à gauche, rotonde et croisement de voies à droite)	47
Figure 5-6	Exemple de la prise en charge d'une hotte MAVL par la navette d'accostage	48
Figure 5-7	Exemple d'une navette de transfert de hotte HA sur rails	49
Figure 6-1	Conteneur de stockage associé à une manutention « individuelle »	54
Figure 6-2	Conteneur de stockage associé à une manutention « avec pré-empilage »	54
Figure 6-3	Vue d'un conteneur type B3.1.2 (à l'envers après démoulage) avec noyau du moule en arrière plan	55
Figure 6-4	Vue intérieure du conteneur B3.1.2 avec les logements des colis de déchets et les évidements pour le passage des pinces	55
Figure 7-1	Position de l'alvéole MAVL dans la couche d'argilite	58
Figure 7-2	Schéma du module de stockage MAVL	59
Figure 7-3	Exemples d'arrangement de colis de stockage dans une alvéole MAVL	60
Figure 7-4	Alvéole MAVL scellée	62
Figure 7-5	Essais de contrôle commande d'un chariot par radiofréquence dans la galerie d'essais du LSBB (Rustrel – 2009)	63
Figure 8-1	Synoptique du processus de mise en place des colis	68
Figure 8-2	Vue du chariot élévateur à fourches (stockeur)	69
Figure 8-3	Synoptique du processus de mise en place des colis	71
Figure 8-4	Vue du pont gerbeur	72
Figure 8-5	Vue de la cellule de manutention et du positionnement des différents équipements	73
Figure 9-1	Colis de stockage HA	80
Figure 9-2	Corps de surconteneur percé-étirés à l'état brut	81
Figure 9-3	Banc d'essais des patins (vue d'ensemble et vue de patins testés)	81
Figure 10-1	Alvéole de stockage de colis HA exothermiques	85
Figure 10-2	Construction de l'alvéole	86
Figure 10-3	Alvéole en cours de creusement dans les argilites (Laboratoire de Meuse Haute-Marne - 2009)	88

Figure 11-1 Hotte de transfert des colis HA et principes de fonctionnement d'une chaîne pousseuse 91
Figure 11-2 Cycle d'introduction de mise en place de colis dans l'alvéole de stockage (cas de colis séparés par deux intercalaires) 92
Figure 11-3 Hotte d'exploitation avec un robot pousseur 93
Figure 11-4 Cycle de mise en position de stockage de plusieurs colis (cas de colis séparés par deux intercalaires) 93
Figure 11-5 Banc d'essais de poussée par chaîne pousseuse 94
Figure 11-6 Démonstrateur de mise en alvéole de colis HA par robot pousseur : vue d'ensemble (en haut) et vue du robot pousseur (en bas) 95
Figure 12-1 Coupe schématique d'un scellement de puits 100
Figure 12-2 Massif d'ancrage en béton au sommet du noyau d'argile gonflante 102
Figure 12-3 Coupe longitudinale schématique d'un scellement de galerie avec saignées de coupure hydraulique 103
Figure 12-4 Exemple de dispositifs envisageables pour assurer la stabilité des massifs d'appui 104
Figure 12-5 Mise en œuvre de remblai en couches inclinées 105
Figure 12-6 Compactage du mélange bentonite/sable dans le scellement du puits principal de l'URL (Canada) 106
Figure 12-7 Scie à bâti ajustable construite pour l'essai de coupure hydraulique KEY (Andra - laboratoire de Meuse/Haute-Marne) 107
Figure 12-8 Répartition des matériaux mis en place dans le démonstrateur 108

Tableaux

Tableau 8-1 Principales caractéristiques des processus de mise en stockage des colis MAVL 74

1

Introduction, démarche d'étude

1.1 Contexte et objet 10
1.2 L'étape 2009 des études et recherches 11
1.3 Les recherches technologiques et les études d'ingénierie sur le stockage réalisées de 2006 à 2009 12
1.4 Introduction de la structure du rapport 13

1.1 Contexte et objet

La loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs dispose que : « *la gestion durable des matières et des déchets radioactifs de toute nature, résultant notamment de l'exploitation ou du démantèlement d'installations utilisant des sources ou des matières radioactives, est assurée dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement. La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures. Les producteurs de combustibles usés et de déchets radioactifs sont responsables de ces substances, sans préjudice de la responsabilité de leurs détenteurs en tant que responsables d'activités nucléaires* » (article L. 542-1 du Code de l'environnement).

Aujourd'hui, la gestion des déchets HA et MAVL, dont la production a commencé dans les années 1960, repose sur leur entreposage. Un renouvellement des capacités d'entreposage les plus anciennes est en cours : ainsi les colis entreposés dans des entrepôts anciens de plusieurs centres du CEA, qui atteignent leur limite temporelle d'exploitation, en sont progressivement retirés pour être placés dans des installations d'entreposage récentes ou en projet (Andra, 2009a).

La loi programme la création d'un centre de stockage réversible profond pour une mise en exploitation en 2025 sous réserve d'étapes préalables de débat public et d'autorisation : « *Après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ». Le stockage de déchets radioactifs est défini comme « *l'opération consistant à placer [les déchets radioactifs] dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542-1 [du Code de l'environnement]. Le stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs est le stockage de ces substances dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité.* »

La réversibilité du stockage pourra préserver les mêmes libertés de choix en matière de gestion des déchets qu'une installation d'entreposage, sur une durée comparable. En revanche, contrairement à l'entreposage, la possibilité de fermer le stockage permettra de pérenniser la protection des personnes et de l'environnement sans, à terme, nécessiter d'intervention humaine. Les objectifs en la matière sont spécifiés par le Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde établi par l'Autorité de sûreté nucléaire (Autorité de sûreté nucléaire, 2008).

La loi charge l'Andra « *de réaliser ou faire réaliser, conformément au plan national [de gestion des matières et des déchets radioactifs], des recherches et études sur l'entreposage et le stockage en couche géologique profonde et d'assurer leur coordination (…). Les études et recherches correspondantes sont conduites en vue de choisir un site et de concevoir un centre de stockage de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation prévue à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement puisse être instruite en 2015 et, sous réserve de cette autorisation, le centre mis en exploitation en 2025* ».

Le décret n° 2008-357 du 16 avril 2008 fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) prévoit que « *au plus tard le 31 décembre 2009, l'ANDRA propose aux ministres chargés de l'énergie, de la recherche et de l'environnement :*

a) Une zone d'intérêt restreinte propice à l'implantation d'un stockage, sur laquelle seront mises en œuvre des techniques d'exploration approfondies ;
b) Des options de conception, de sûreté opérationnelle et à long terme et de réversibilité ;
c) Un modèle d'inventaire des déchets à prendre en compte ;
d) Des options d'entreposage en complément du stockage. »

Dans ce cadre, l'objet du présent rapport est de présenter des options de conception d'un stockage, en support à la proposition d'options de sûreté, opérationnelle et à long terme, et de réversibilité (Andra, 2009b et 2009c).

Les options présentées dans la suite couvrent l'ensemble des colis de déchets ultimes[1] existants ou à produire, sur la base de l'exploitation du parc d'installations nucléaires actuelles ou d'ores et déjà décidées jusqu'à leur démantèlement[2]. Les caractéristiques de ces colis, ainsi que les quantités retenues à ce stade pour le dimensionnement du stockage, font l'objet d'un modèle d'inventaire de dimensionnement[3] (MID) mis à jour en 2009 (Andra, 2009d).

Le stockage est étudié dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien investiguée au moyen du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (Andra, 2009e). Les options présentées sont cohérentes avec la proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) et de scénarios d'implantation en surface. Cette ZIRA se situe à l'intérieur de la zone de 250 kilomètres-carrés dans laquelle les données acquises au Laboratoire peuvent être transposées (Andra, 2009f).

1.2 L'étape 2009 des études et recherches

Au terme de quinze années de recherches organisées par la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, le dossier remis par l'Andra en 2005 avait montré la faisabilité de principe du stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien étudiée (Andra, 2005a). Ce dossier proposait notamment des architectures de stockage dont le niveau de définition et le degré d'optimisation étaient adaptés à une évaluation de faisabilité (Andra, 2005b). Ces architectures illustraient l'existence de solutions techniques concrètes répondant aux exigences de sûreté et à la demande de réversibilité.

Le Dossier 2005 a fait l'objet d'évaluations scientifiques en 2005 et 2006. Tout en confirmant les principales conclusions du dossier, les évaluateurs ont émis diverses recommandations sur la poursuite des études d'ingénierie du stockage, principalement :

- examiner des options alternatives en matière de ventilation, en particulier pour les déchets MAVL,
- conforter la conception des composants métalliques du stockage vis-à-vis de la corrosion, pour les déchets HA,
- améliorer la compréhension du comportement mécanique de la roche en lien avec les techniques de creusement,
- approfondir l'étude des dispositions concourant à la radioprotection des opérateurs et à la sûreté en exploitation, notamment en tenant compte des incidents possibles lors des opérations de transfert et de mise en place des colis dans les alvéoles,
- confirmer l'efficacité des dispositions permettant la reprise éventuelle des colis pendant la phase de réversibilité.

De manière générale, les évaluateurs ont souligné l'intérêt de démonstrateurs pour confirmer le bien fondé des choix de concepts techniques.

---

[1] La loi définit les déchets radioactifs comme des « substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée ». « Les déchets radioactifs ultimes sont des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

[2] Les déchets HA et MAVL de l'industrie électronucléaire proviennent essentiellement des combustibles usés déchargés des réacteurs de production d'électricité. Les combustibles à l'oxyde d'uranium (UOX) déchargés des 58 réacteurs EDF en opération sont actuellement traités par Areva dans ses usines de La Hague. Il s'y ajoute des déchets d'exploitation des réacteurs nucléaires, ainsi que des déchets d'exploitation et de maintenance des usines de traitement (déchets dits « technologiques »). Des déchets proviennent aussi de l'usine aujourd'hui arrêtée de Marcoule, qui a traité des combustibles de la filière de réacteurs de première génération UNGG (Uranium naturel, graphite gaz). Les déchets HA et MAVL issus d'autres activités que la production électronucléaire (recherche, défense) sont le plus souvent des déchets technologiques, ainsi que des résidus de traitement d'effluents. Il existe par ailleurs une petite quantité de combustibles usés issus notamment de réacteurs de recherche, qui constituent des déchets ultimes car ne pouvant être traités dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes.
Les déchets sont conditionnés par leurs producteurs. Le conditionnement consiste à solidifier ou immobiliser les déchets et à les placer dans un conteneur qui en facilite la manutention et l'entreposage dans les installations industrielles. Le colis ainsi produit est dénommé « colis primaire », pour le distinguer du « colis de stockage », forme sous laquelle les déchets seront placés dans les alvéoles de stockage.

[3] Le MID ajoute des marges aux prévisions des producteurs de déchets pour tenir compte des incertitudes sur les scénarios de production électronucléaire et de gestion des déchets, sur les caractéristiques des colis et sur leur inventaire. Il définit ainsi des données d'entrée prudentes pour le dimensionnement du stockage. Une première version du MID avait été remise en 2005.

Les études et recherches menées entre 2006 et 2009 se sont particulièrement attachées à répondre aux points mis en exergue par les évaluateurs. Elles ont aussi exploré des pistes d'optimisation des architectures de stockage à partir d'une analyse du retour d'expérience du Dossier 2005.

Les résultats obtenus en 2009 permettent de préciser des éléments structurants de spécifications au moment de passer d'une phase d'études de faisabilité et d'optimisation des concepts à une phase d'avant-projet à finalité plus industrielle.

Parmi ces éléments structurants, les options de sûreté définissent les fonctions de sûreté à assurer pour protéger l'homme et l'environnement vis-à-vis de la radioactivité des déchets, et définissent les exigences à prendre en compte à la conception du stockage pour réduire les risques d'origine interne (par exemple le risque de dissémination en cas de chute de colis de déchets) ou externe (chute d'avion, séisme…). Les options de réversibilité du stockage constituent des propositions en matière de flexibilité de gestion du stockage et de niveaux de récupérabilité des colis ; elles orientent également la conception du stockage, de manière à favoriser ces composantes de la réversibilité.

Sur ces bases, les études d'ingénierie menées au-delà de 2009 préciseront la description technique des installations, en lien avec les travaux de reconnaissance approfondie et la poursuite d'expérimentations au Laboratoire souterrain et d'essais technologiques. Elles prépareront le débat public sur le projet prévu à l'horizon 2013 puis la remise d'une demande d'autorisation de création qui sera évaluée en 2015.

Les options de conception proposées fournissent une base pour les options de réversibilité et de sûreté. Elles orientent les études d'ingénierie et les essais de démonstration à venir.

Les solutions techniques présentées dans la suite confirment la faisabilité et le réalisme industriel de ces options, qu'elles permettent d'illustrer. En se projetant jusqu'à la fermeture définitive du centre de stockage, elles fournissent un cadre aux simulations et aux analyses de sûreté du stockage. Elles ne figent pas la description de l'architecture du stockage ; celle-ci pourra évoluer dans le cadre du processus itératif d'optimisation adopté pour la conception du stockage.

1.3 Les recherches technologiques et les études d'ingénierie sur le stockage réalisées de 2006 à 2009

Le programme d'études d'ingénierie et d'essais technologiques mené entre 2006 et 2009 a amené à compléter, optimiser voire modifier les solutions techniques relatives à la construction, l'exploitation et la fermeture du stockage qui avaient été présentées dans le Dossier 2005 Argile.

Les travaux réalisés dans ce cadre ont permis de préciser le choix des options de conception du stockage et ont permis de démontrer le réalisme de certaines des solutions techniques proposées par des essais au Laboratoire souterrain de Meuse – Haute Marne ou des démonstrateurs technologiques, qui sont présentés dans l'Espace technologique de Saudron, ouvert au public mi-2009.

Figure 1-1 *Espace technologique Andra (Saudron) avec démonstrateurs de conteneurs de stockage MAVL (à gauche) et démonstrateur de mise en place des colis HA (à droite)*

La réalisation du programme a donné lieu à l'attribution d'études après appels d'offres européens à des ingénieries reconnues dans le domaine de l'ingénierie nucléaire, du génie civil et des travaux souterrains, de la mécanique, des études de simulation (thermique, collision / chute…). A titre d'exemple, des études sur le conteneur de stockage MAVL ont été réalisés par un groupement d'entreprises afin de disposer des diverses compétences nécessaires en matière d'ingénierie nucléaire (Areva / SGN), de mécanique (CNIM), de fabrication d'objets en béton (Bonna-Sabla, Areva / Sogefibre). Ceci préfigure les montages qui seront nécessaires lors du lancement des futurs contrats de maîtrise d'oeuvre pour la préparation des échéances futures - débat public à l'horizon 2013 et demande d'autorisation de création du stockage.

Par ailleurs, des essais technologiques ont été réalisés principalement sur les thèmes suivants[4] :

- Les conteneurs de stockage MAVL en béton armé : essais de nouvelles formulations, réalisation de maquettes puis de conteneurs de stockage à l'échelle 1 pour un colis de stockage B3.1.2 de masse plus importante que les colis (B2 et B5) précédemment fabriqués par l'Andra en 2004 – 2005 ;
- Les équipements de stockage des colis HA : démonstrateur de manutention avec robot pousseur développé dans le cadre du projet européen « ESDRED[5] », essais de poussée de colis avec chaîne pousseuse…) ;
- Les équipements de stockage des colis MAVL (en cours).

Ces différentes recherches menées par l'Andra se sont traduites par le dépôt de brevets liés aux résultats acquis, notamment en ce qui concerne les moyens spécifiques développés pour le transfert et la manutention des colis.

1.4 Introduction de la structure du rapport

Le présent rapport vise à présenter une synthèse des solutions en cours d'études pour les différents composants du centre de stockage.

Le chapitre 2 fournit une vision d'ensemble des fonctionnalités, de l'architecture et de l'articulation des composants d'un centre de stockage réversible profond.

Les chapitres 3 à 12 décrivent successivement ces différents composants.

Chacun de ces chapitres introduit d'abord les principaux objectifs fonctionnels à prendre en compte en lien avec les fonctions de sûreté du stockage ou la réversibilité. Il identifie les options de conception proposées à ce stade. Il présente ensuite des solutions techniques avec, éventuellement, plusieurs possibilités offertes. Des références industrielles (dans le domaine nucléaire, en travaux souterrains et dans d'autres secteurs) ainsi que les résultats d'essais technologiques réalisés par l'Andra viennent appuyer les solutions décrites.

Le chapitre 3 décrit les installations de surface du centre de stockage. Une solution possible est proposée, avec la répartition des installations de surface sur deux sites distincts qui seraient éloignés de quelques kilomètres. La présentation de ces sites reste générique à ce stade du projet. Les scénarios d'implantation en surface proposés en 2009 (Andra, 2009f) seront étudiés pour préparer le débat public prévu en 2013.

Le chapitre 4 donne ensuite une vision générale de l'architecture souterraine du stockage en présentant les options de conception qui ont prévalu pour concevoir les infrastructures du stockage et l'agencement modulaire des zones de stockage. Une architecture souterraine « à terminaison » est présentée : elle donne une image du stockage à la fin de son exploitation[6]. Cette architecture sera

---

[4] Pour répondre à l'hypothèse d'un éventuel stockage des colis de combustibles usés de type CU1 et CU2, l'Andra a par ailleurs procédé dans le cadre du projet ESDRED à la fabrication d'anneaux de barrière ouvragée en bentonite et à la réalisation d'un démonstrateur de transfert de combustibles usés (40 t) sur coussin d'air.

[5] Le projet européen « ESDRED » (Engineering studies and demonstration of repository designs) a regroupé des partenaires de 9 pays, tels que SKB (Suède), Posiva (Finlande) Nagra (Suisse), Ondraf/Niras (Belgique), NDA (Angleterre), DBE-Technology (Allemagne). Les actions de recherche ont concerné les développements technologiques liés au stockage.

[6] Cette architecture pourra évoluer au cours de la durée séculaire de l'exploitation du stockage.

implantée dans la suite des études dans la zone d'intérêt proposée en 2009 (Andra, 2009f). La description de la première tranche d'ouvrages à réaliser sera également approfondie en vue du dossier de demande d'autorisation de création.

Le chapitre 5 aborde ensuite les aspects liés à l'exploitation nucléaire du stockage avec, pour commencer, les procédés de transfert des colis de stockage depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage.

Les chapitres 6 à 8 décrivent plus précisément les composants de la zone de stockage MAVL en présentant successivement le conteneur de stockage, l'alvéole de stockage et enfin, les moyens de manutention des colis utilisés pour leur mise en place en alvéole, ou leur éventuel retrait.

Les chapitres 9 à 11 décrivent de même les composants de la zone de stockage HA.

Les ouvrages de fermeture du stockage, qui pourront être réalisés de manière progressive à la suite des activités d'exploitation du stockage, sont décrits au chapitre 12, en distinguant les ouvrages de scellement et les opérations de remblayage des ouvrages souterrains.

2

Fonctionnalités et articulation d'ensemble des composants du stockage

2.1 Les fonctions de sûreté du stockage 16
2.2 La réversibilité du stockage 17
2.3 Les principaux composants d'un centre de stockage 19

2.1 Les fonctions de sûreté du stockage

L'objectif fondamental du stockage en formation géologique profonde est rappelé par le Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (ASN, 2008) : « *La protection des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental assigné au stockage des déchets en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques* ».

La protection de l'homme et de l'environnement repose sur l'accomplissement de fonctions de sûreté et sur le respect d'exigences de sûreté de conception et d'exploitation qui garantissent leur maintien dans toutes les situations de fonctionnement ou de configurations pour lesquelles elles sont requises.

En exploitation, les fonctions de sûreté d'un stockage de déchets radioactifs sont comparables à celles de toute autre installation nucléaire, notamment protéger le personnel, le public et l'environnement des risques de dissémination des substances radioactives et d'exposition externe aux rayonnements ionisants.

Sur la base de l'analyse des risques recensés sur le stockage, ces fonctions de sûreté sont les suivantes :

- Confiner les substances radioactives contenues dans les déchets, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion : cette fonction est assurée par les conteneurs et par un ensemble de dispositions en cas d'accident d'exploitation (chute, incendie).
- Protéger les personnes contre l'irradiation : la protection vis-à-vis de l'irradiation se traduit par l'interposition d'écrans de protection fixes ou mobiles et par l'éloignement des opérateurs vis-à-vis des colis.
- Évacuer les gaz de radiolyse, à la fois vis-à-vis de risques d'explosion et de leur potentielle toxicité : l'évacuation des gaz de radiolyse formés par certains déchets MAVL évite leur accumulation dans les colis et installations de stockage, et l'atteinte de la limite d'explosivité en présence d'oxygène ; la ventilation contribue à cette fonction.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité : il s'agit d'éviter un accident de criticité, dont les conséquences pourraient notamment remettre en cause les fonctions de confinement et de protection contre l'irradiation. Cela implique de maîtriser le contenu des déchets en matières fissiles et de vérifier la compatibilité des géométries des colis et ouvrages de stockage concernés par ce risque.
- Évacuer la puissance thermique résiduelle des déchets : il s'agit de protéger les travailleurs contre les risques liés à une élévation de température due aux dégagements de chaleur des déchets. Cette fonction permet aussi de protéger les colis d'une montée excessive en température qui pourrait dégrader leurs propriétés de confinement ou altérer les composants du stockage.

Les recherches sur le stockage en formation géologique profonde s'inscrivent dans l'objectif de « *prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations futures* » (loi n° 2006-739 du 28 juin 2008, article 2). Aussi, le stockage est conçu de manière à pouvoir être fermé. Après cette fermeture, la protection de l'homme et de l'environnement sera assurée par la mise en œuvre de dispositions passives. En effet, le Guide de sûreté précise : « *Après la fermeture de l'installation, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée* ».

La passivité du stockage après la fermeture constitue la différence fondamentale de fonctionnement avec un entreposage. Ces dispositions passives sont multiples : en se complétant mutuellement, elles optimisent les performances globales du système ; en offrant une certaine redondance, elles permettent de mieux résister à une défaillance ou à une perturbation externe (notamment une intrusion humaine involontaire).

Ainsi, les fonctions de sûreté du stockage accomplies de manière passive après fermeture sont les suivantes :

- Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines : le stockage en profondeur met les déchets à l'abri de phénomènes d'érosion et des activités humaines courantes, qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain.

- S'opposer à la circulation d'eau, limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage, retarder et atténuer la migration des radionucléides :

  Les formations géologiques profondes sont saturées en eau. L'arrivée d'eau et son renouvellement au voisinage des déchets constituent le principal risque à long terme d'endommagement des colis, susceptible d'aboutir au relâchement de radionucléides ou de toxiques chimiques à l'intérieur du stockage. Cette eau constitue aussi un vecteur potentiel de transport des radionucléides.

  Pour s'opposer à la circulation d'eau, limiter le relâchement des radionucléides dans l'eau, retarder et atténuer leur migration en phase aqueuse, on mobilise les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité, capacité de rétention, propriétés géochimiques, environnement hydrogéologique). L'âge de la formation, sa stabilité tectonique, la profondeur d'implantation du stockage permettent d'envisager la permanence de ces propriétés favorables aux échelles de temps étudiées après la fermeture, de celle du millier d'années à celle de plusieurs centaines de milliers d'années.

  Pour maintenir ces fonctions de sûreté même en cas de situation altérée, le stockage est fractionné pour circonscrire autant que possible les effets à une fraction de l'inventaire stocké.

Les propriétés favorables du milieu géologique doivent être préservées, en maîtrisant les perturbations qui pourraient résulter du creusement et de l'exploitation des ouvrages souterrains du stockage, des matériaux rapportés et de la présence des déchets, en particulier de la charge thermique qu'ils engendrent.

Le stockage doit ainsi dissiper la chaleur produite par la radioactivité des déchets HA. En effet, l'échauffement de la roche pourrait y engendrer des processus couplés complexes si la température excédait 100 °C. Il pourrait aussi provoquer des transformations minéralogiques des argilites si des températures trop élevées étaient maintenues sur de longues durées. Pour rester dans un domaine de fonctionnement où les phénomènes sont connus et réduire l'endommagement des argilites, la conception du stockage limite la température à 90 °C au contact de l'alvéole de stockage et de la roche.

Une autre exigence concerne la maîtrise des déformations mécaniques dans la formation d'accueil. En effet, le caractère argileux de la roche étudiée limite sa résistance mécanique en cas de déformation. Lors du creusement et de l'exploitation des cavités, un soutènement et un revêtement soutiennent la roche et limitent ainsi ses déformations. A très long terme, de nouvelles déformations pourraient intervenir à mesure de l'altération des matériaux ouvragés. L'intensité des déformations dans la roche est alors reliée au volume des vides résiduels dans les colis et les ouvrages, que l'on cherchera donc à minimiser.

On cherchera aussi à préserver la mémoire du stockage. L'isolement durable des déchets radioactifs dans un stockage profond n'impose pas la mémoire à long terme de l'existence du stockage. Toutefois la préservation de cette mémoire constitue un thème des recherches engagées.

2.2 La réversibilité du stockage

L'Andra a défini la réversibilité comme la possibilité d'un pilotage progressif et évolutif du processus de stockage, laissant aux générations à venir une liberté de décision sur ce processus. Cette définition se décline en trois volets complémentaires : (i) la capacité à reprendre les colis (ou « récupérabilité »), (ii) la capacité à intervenir sur le processus de stockage, (iii) la capacité à faire évoluer la conception du stockage.

Un stockage réversible est conçu pour faciliter la récupération des colis stockés (i) pour le cas où le stockage n'évoluerait pas comme prévu[7], (ii) pour le cas où un déchet considéré comme ultime au moment du stockage deviendrait une matière, (iii) plus généralement pour le cas où l'on déciderait d'un autre mode de gestion.

Si elle est étroitement reliée à la récupérabilité des colis, la capacité à intervenir sur le processus de stockage a une portée plus large. Après les décisions de créer puis de mettre le centre en exploitation, elle consiste à ouvrir la possibilité de plusieurs choix de gestion au cours du processus de stockage : poursuivre le stockage selon le schéma prédéfini, se donner les moyens d'une réévaluation, faire évoluer le stockage ou encore inverser le processus jusqu'à la possibilité de récupérer des colis stockés.

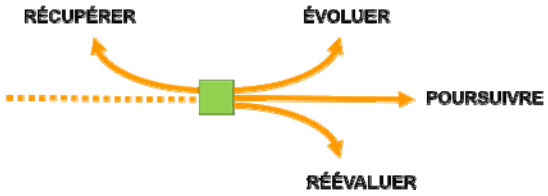


Figure 2-1 *Les choix de gestion possibles à chaque étape du processus de stockage*

En pratique, cela conduit à ordonnancer le stockage sur la base d'étapes intermédiaires. Les choix de gestion seraient alors examinés à chaque étape, selon des modalités décisionnelles spécifiées ; en particulier l'impact de chaque choix possible de gestion sur la sûreté de l'installation[8] sera évalué, ainsi que sur les modalités de réversibilité. Les étapes intermédiaires du processus de stockage constitueront ainsi des points de rendez-vous entre le gestionnaire du stockage et les parties prenantes.

Les niveaux de responsabilité impliqués dans les décisions seraient proportionnés aux enjeux techniques, économiques et sociaux de chaque étape.

Un stockage donnant une capacité d'action concrète doit être conçu de façon à offrir une flexibilité dans le temps pour le franchissement de chaque étape et à faciliter des ré-orientations techniques.

La capacité d'action commence à la décision de créer de nouveaux modules de stockage pour une famille de déchets, et de mettre en stockage cette famille. La réalisation progressive du stockage et l'accueil de nouvelles familles de colis au cours du temps donnent des étapes intermédiaires pour cette capacité d'action. La disponibilité d'installations d'entreposage offre une flexibilité à la prise de décision.

La capacité d'action sur le stockage se traduit aussi par la possibilité donnée aux générations suivantes de mettre en œuvre des étapes intermédiaires de fermeture, tout en vérifiant qu'il resterait possible de récupérer des colis stockés après ces étapes (sachant que les opérations de retrait deviendraient progressivement plus longues et potentiellement plus complexes). La décision de franchir ces étapes pourra être motivée par une simplification des opérations industrielles, une diminution de l'impact environnemental de l'exploitation du centre ou une progression vers une plus grande passivité de la gestion des déchets.

Conséquence de la capacité d'action sur le processus, le troisième volet de la réversibilité est la possibilité de faire évoluer la conception du stockage au fur et à mesure de sa mise en œuvre. Cette possibilité permettra de mettre à profit le retour d'expérience et les progrès techniques. Elle se traduit techniquement par une adaptabilité aussi grande que possible de l'architecture du centre de stockage.

---

[7] La récupérabilité de colis en cas de dysfonctionnement relève aussi de l'approche de la sûreté de l'installation, au titre de la défense en profondeur.

[8] à l'instar du réexamen périodique du référentiel de sûreté des INB.

L'observation et la surveillance du stockage concourent au processus décisionnel relié à la réversibilité, en apportant des éléments sur le fonctionnement de l'installation et sur sa conformité aux prévisions, ainsi que sur l'évolution des conditions de réversibilité. En particulier l'observation de l'évolution des ouvrages permettra de réévaluer la durée de réversibilité au cours du temps, compte tenu des marges adoptées dans les dimensionnements. Il est ainsi envisageable qu'un réexamen des modalités de réversibilité soit effectué périodiquement, à l'image du référentiel de sûreté[9].

La loi de programme du 28 juin 2006 stipule que la réversibilité devra être assurée pour une durée ne pouvant être inférieure à 100 ans, les conditions de réversibilité devant être fixées par une future loi. Conformément au décret du 16 avril 2008 fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, l'Andra a proposé en 2009 des options de réversibilité (Andra, 2009c) qui orientent la suite des études et des recherches.

2.3 Les principaux composants d'un centre de stockage

Le centre de stockage comprend des installations de surface, des installations souterraines et des ouvrages reliant la surface et le fond.

Les installations de surface doivent permettre l'organisation et la gestion des flux relatifs aux différentes activités menées dans le stockage, avec deux grands ensembles dédiés aux travaux de construction et à l'exploitation nucléaire.

Le premier ensemble regroupe les ouvrages et les bâtiments de soutien des activités de construction du stockage, en prenant en compte la gestion des déblais issus du creusement.

Le second ensemble est voué aux activités nucléaires du centre avec la réception des emballages de transport, l'extraction et le contrôle des colis primaires de déchets radioactifs et leur conditionnement dans des conteneurs de stockage. A l'instar de toute installation industrielle, cet ensemble devrait comprendre des capacités d'entreposage tampon pour la gestion du flux des colis, tant pour les emballages que pour les colis en attente de mise en stockage.

Il n'existe pas de nécessité technique pour que des capacités d'entreposage plus grandes soient implantées sur le futur centre de stockage. Cependant, au lieu de certaines extensions futures sur les sites de production et de conditionnement, une réalisation éventuelle de capacités d'entreposage sur le centre de stockage constituerait une opportunité qui méritera d'être examinée (entreposage de déchets HA pour décroissance thermique, entreposage de colis de déchets utilisé en cas de retrait des colis du stockage…) (Andra, 2009a).

Les implantations souterraines du stockage seront implantées en position médiane dans la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien. L'architecture souterraine sépare physiquement les différentes catégories de colis (MAVL, HA). Cette séparation en différentes zones de stockage évite la prise en compte d'interactions potentielles entre ces différentes catégories de déchets, dans l'étude de l'évolution à long terme du stockage.

Pour répondre aux besoins de fractionnement liés à la sûreté à long terme, et de modularité favorisant la flexibilité et la progressivité de la construction et de l'exploitation du stockage, les zones de stockage sont elles mêmes subdivisées de façon arborescente en sous-zones, modules et alvéoles de stockage.

---

[9] « *L'exploitant d'une installation nucléaire de base procède périodiquement au réexamen de la sûreté de son installation en prenant en compte les meilleures pratiques internationales. Ce réexamen doit permettre d'apprécier la situation de l'installation au regard des règles qui lui sont applicables et d'actualiser l'appréciation des risques ou inconvénients que l'installation présente pour les intérêts mentionnés au I de l'article 28, en tenant compte notamment de l'état de l'installation, de l'expérience acquise au cours de l'exploitation, de l'évolution des connaissances et des règles applicables aux installations similaires* » (article 29 de la loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (loi n°2006-686).

Les modules, les sous-zones et les zones de stockage sont reliés par des faisceaux de galeries de liaison à la zone centrale où accèdent les ouvrages de liaison surface - fond. La coexistence dans le stockage d'activités d'exploitation nucléaire, caractérisées par des risques et des contraintes particulières (radioprotection, sûreté opérationnelle…), et d'activités de construction (puis, ultérieurement, de fermeture), a conduit à adopter un principe de séparation des flux avec deux circuits dédiés :

- l'un aux activités de construction (puis de fermeture), qui s'organise autour des ouvrages de liaison surface/fond de travaux et de service et autour des galeries de liaison dédiées aux travaux ;
- l'autre aux activités d'exploitation nucléaire, notamment le transport des hottes contenant les colis, qui s'organise autour de l'ouvrage de liaison surface/fond de descente des colis et autour des galeries de transfert des colis jusqu'aux galeries d'accès aux alvéoles de stockage.

Cette séparation est également réalisée pour les circuits de ventilation : les galeries de transfert des colis disposent d'une alimentation en air frais indépendante de celle des galeries de travaux, ce qui contribuera à éviter une introduction de poussières et de fumées engendrées par les activités de construction dans les ouvrages où sont menées les activités d'exploitation nucléaire.

Les ouvrages de liaison entre la surface et les installations souterraines du stockage comprennent deux types d'ouvrage : les puits et les galeries inclinées (descenderies).

- Les puits verticaux sont situés à l'aplomb des ouvrages souterrains. Dans les solutions techniques présentées, ils comprennent des puits de ventilation, un puits d'extraction des déblais et de transfert du matériel, un puits d'accès pour le personnel.
- La descenderie comprend un ouvrage dédié au transfert des colis de stockage ainsi qu'un ouvrage de service permettant l'accès des personnes et des équipements.

Lorsque la fermeture est décidée, elle est mise en œuvre progressivement par un remblaiement du réseau de galeries de liaison et la construction de scellements. Les scellements destinés à isoler le stockage de son environnement sont établis dans les ouvrages de liaison surface/fond, et en redondance, dans les galeries de liaison à proximité de la base des ouvrages de liaison surface/fond. Des scellements contribuant au fractionnement du stockage (pour réduire son impact en situation altérée) sont aussi établis dans les galeries de liaison et d'accès aux modules de stockage ; ils réalisent le fractionnement à l'échelle des zones (ou sous-zones) et des modules de stockage.

3

Installations de surface

3.1 Objectifs fonctionnels 22
3.2 Options de conception 22
3.3 Les solutions présentées 23

3.1 Objectifs fonctionnels

Les installations de surface ont des fonctions d'exploitation nucléaire et des fonctions de soutien aux installations souterraines.

Des ateliers nucléaires réaliseront le contrôle et le déchargement des emballages de transport utilisés pour amener des colis depuis les sites de production, ainsi que le chargement/déchargement des hottes pour le transfert des colis de stockage entre la surface et les installations souterraines. Seuls des colis ne présentant pas de contamination surfacique externe labile ni de risque de mise en suspension de particules radioactives seront pris en charge. Ces ateliers (ou des ateliers dédiés) réaliseront aussi des fonctions de contrôle des colis et d'assemblage des colis de stockage, selon la répartition de ces activités entre les sites de production et le site de stockage (cette répartition pourra être spécifique à chaque famille de colis). Enfin, si le centre de stockage est doté de capacités d'entreposage, ces dernières seront implantées dans des ateliers nucléaires en surface.

En soutien aux installations souterraines, la ventilation sera assurée en surface par des unités d'extraction d'air dotées, comme les ateliers nucléaires, d'une cheminée pour les rejets gazeux.

Il s'y ajoute la mise en verse des déblais excavés, dont une partie sera réutilisé pour le remblayage ultérieur des galeries souterraines.

D'autres fonctions de soutien concernent la maintenance des équipements d'exploitation, le stockage des pièces détachées, la préparation des matériaux de construction, puis de remblayage et de scellement des installations souterraines, la zone vie etc.

L'objectif de durabilité séculaire s'applique donc non seulement aux installations souterraines, mais potentiellement aussi à des ateliers en surface.

3.2 Options de conception

Les installations de surface peuvent être implantées au sein d'une seule zone d'implantation et, dans ce cas, celle-ci est alors nécessairement à l'aplomb du stockage souterrain. On peut aussi choisir une solution avec plusieurs zones de surface déconnectées. Dans ce dernier cas, une zone serait toujours nécessairement à l'aplomb des installations souterraines tandis que celle liée à l'implantation des entrées de descenderies pourrait en être éloignée de quelques kilomètres (cf. Figure 3-1).

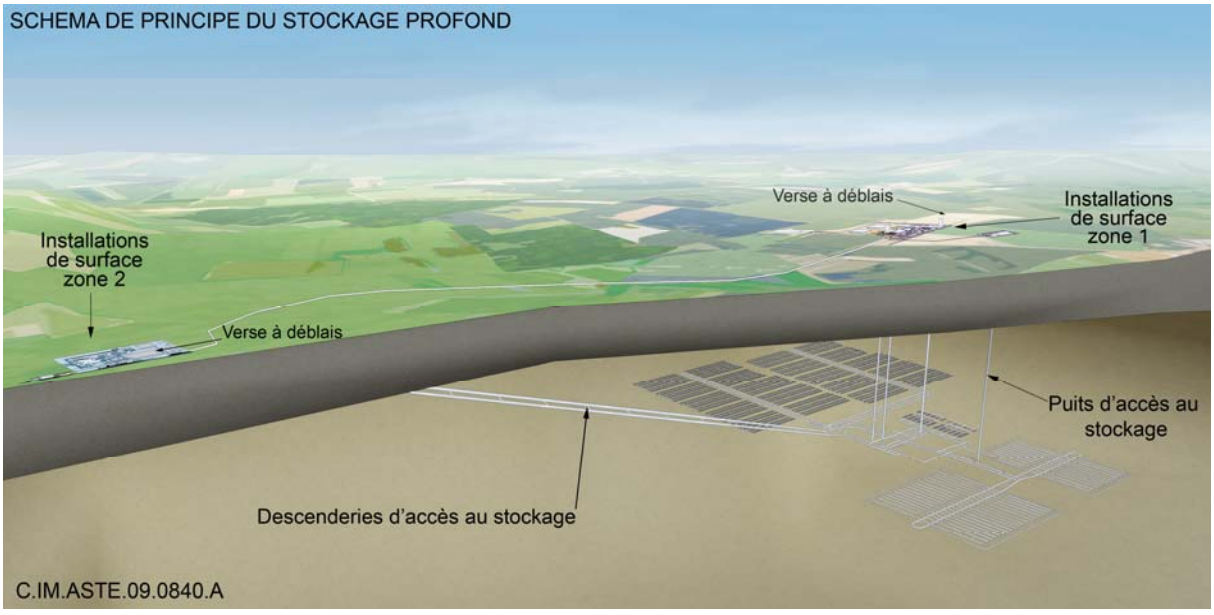


Figure 3-1 *Exemple d'une architecture du stockage avec 2 zones d'implantation d'installations de surface*

Les installations nucléaires de surface assurant le déchargement des emballages de transport, le contrôle des colis, la mise en conteneur de stockage et éventuellement l'entreposage seront connectées à l'ouvrage de liaison qui assure le transfert des colis de stockage entre la surface et le fond.

La conception des installations sera modulaire pour permettre une extension progressive en fonction des besoins.

3.3 Les solutions présentées

Les études ont montré la possibilité de découpler une partie des installations de surface par rapport aux installations souterraines, au moyen d'une descenderie « déroulée ». Cette option technique conduit à distinguer deux zones pouvant être séparées de quelques kilomètres :

- La première zone, liée aux travaux, est située à l'aplomb des installations souterraines du stockage.
- La deuxième zone est liée à la descenderie pour le transfert des colis de stockage entre les installations de surface et les installations souterraines.

L'exemple donné ci-après montre ce que pourraient être les principales installations et fournit un ordre de grandeur des emprises nécessaires pour chacune des deux zones.

Les éléments et les figures qui suivent constituent des illustrations préliminaires qui ne tiennent pas compte à ce stade de l'insertion paysagère, de l'insertion des verses, des choix architecturaux, des contraintes liées à la topographie, à l'écoulement des eaux... Sur la base des scénarios d'implantation proposés en 2009 (Andra, 2009f), les modalités d'insertion des installations dans leur environnement seront examinées (gestion des eaux et des verses, insertion paysagère, proposition d'esquisses architecturales, dispositions à prendre dans la perspective de la phase chantier, examen avec les concessionnaires des modalités d'acheminement des matériaux...). D'ici 2013, une réflexion d'ensemble sur les transports sera également conduite en lien avec les services de l'Etat, les collectivités et les exploitants concernés, en vue de définir un schéma directeur des transports pour la desserte du secteur.

3.3.1 Les installations industrielles associées à la zone « puits »

3.3.1.1 Partie conventionnelle

Les installations sont liées pour l'essentiel aux fonctions du puits d'« extraction des déblais » et du puits « personnel » :

- La superstructure du puits d'extraction des déblais et de transport de matériel (puits de travaux) avec l'ensemble des bâtiments techniques associés (salle de conduite, ventilation, alimentation d'électrique, groupes électrogènes...) et les zones d'interface nécessaires pour l'évacuation des déblais et l'approvisionnement du matériel (halle de manutention ...),
- Une verse de dépôt des matériaux extraits, dont une partie (de l'ordre de 40%) sera à terme utilisée pour les travaux de fermeture des installations souterraines du stockage),
- La superstructure du puits de transport du personnel et l'ensemble des bâtiments techniques associés (salle de conduite, ventilation, alimentation électrique, groupes électrogènes...) et des locaux personnel (contrôle d'accès, lampisterie, douches et vestiaires ...),
- L'unité de gestion centralisée des informations,
- Les installations techniques nécessaires au fonctionnement et à l'approvisionnement du stockage (transformateur électrique, centrale à béton, ateliers, magasins ...),
- Les bâtiments support à usage du personnel (bureaux, infirmerie, salle de restauration ...),
- Les installations liées au contrôle des eaux et à la surveillance de l'environnement (bassins de décantation des eaux d'exhaure des installations souterraines et unités de traitement des eaux, station d'épuration des eaux usées, bassin d'orage ...),
- Les aires de dépôt d'équipements et de matériels,
- Les voiries, et éventuellement, un terminal ferroviaire.

3.3.1.2 Partie nucléaire

Les installations concernées seraient limitées aux puits de ventilation de retour d'air, avec les superstructures des puits de ventilation et les bâtiments techniques associés (ventilation, contrôle de l'air, alimentation d'électrique, groupes électrogènes…).

3.3.1.3 Emprise des installations

L'ordre de grandeur de la superficie requise serait de l'ordre de 200 hectares suivant les facteurs de site (topographie, environnement…). Une grande partie de cette superficie est liée à la verse de déblais, qui est dimensionnée pour permettre de différer les opérations de remblayage des galeries. Les matériaux produits par l'excavation des galeries et des alvéoles seront entreposés progressivement, en lien avec le développement progressif des infrastructures souterraines. Les possibilités d'insertion de la verse dans son environnement seront examinées en lien avec les scénarios d'implantation. L'Andra étudie les possibilités de réutiliser une partie des déblais (réaménagement de carrières proches en fin d'exploitation, fabrication de ciment…).

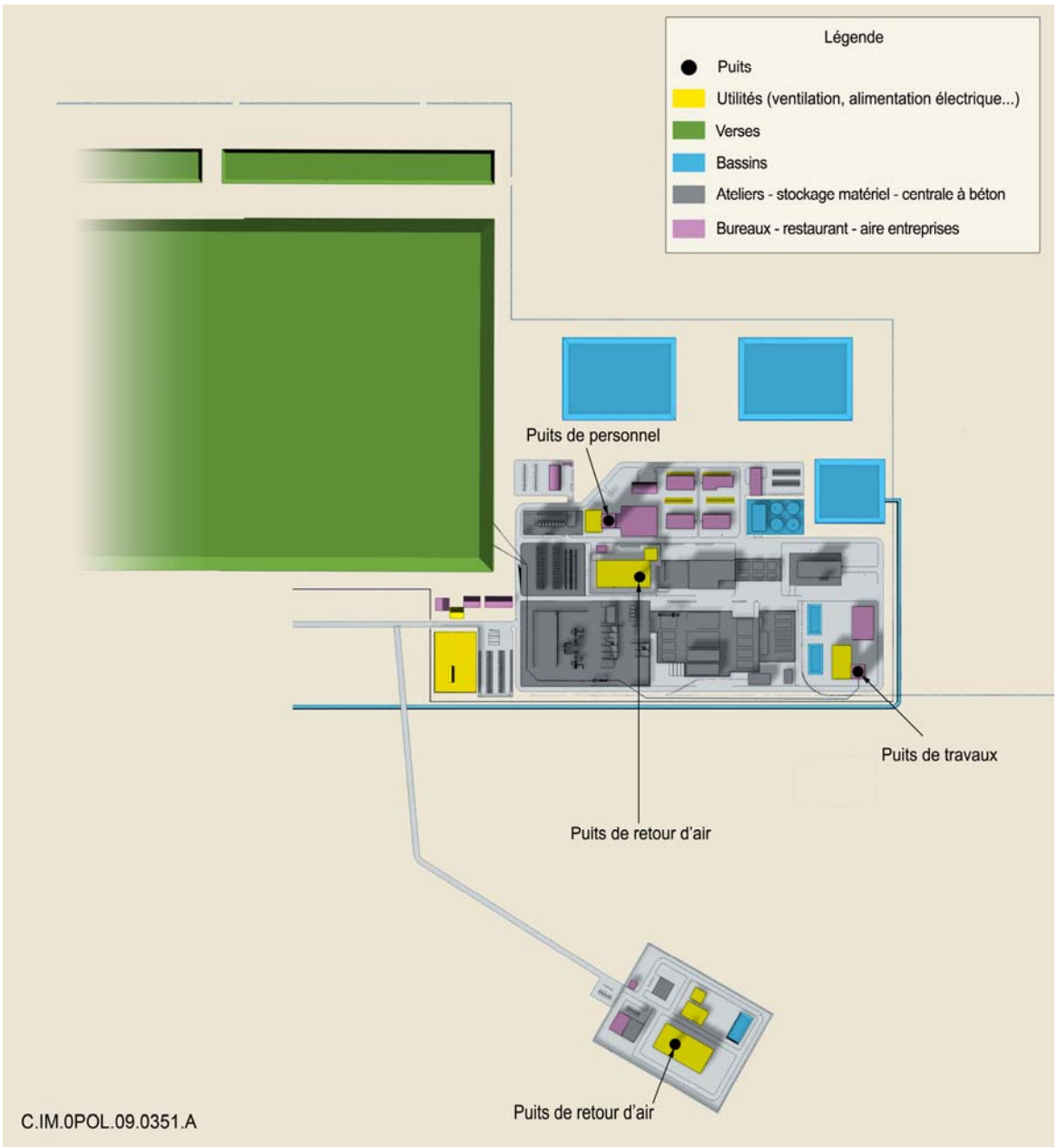


Figure 3-2 Exemple d'une zone « puits »

3.3.2 Les installations industrielles associées à la zone «descenderie»

3.3.2.1 Partie conventionnelle

Les installations sont liées essentiellement à l'extraction des déblais issus des travaux de creusement de la descenderie et des premières galeries, puis aux fonctions de la galerie de service qui sera exploitée en parallèle de la galerie de transfert des colis de stockage :

- Les bâtiments techniques associés à la galerie de service (ventilation, alimentation électrique, exhaure…) et des locaux personnels (contrôle d'accès, lampisterie, douches et vestiaires …),
- Les zones d'interface nécessaires pour l'approvisionnement du matériel,
- Les installations techniques nécessaires au fonctionnement et à l'approvisionnement du stockage (transformateur électrique, ateliers, magasins …),
- Les bâtiments support à usage du personnel (bureaux, infirmerie, salle de restauration …),
- Les installations liées au contrôle des eaux et à la surveillance de l'environnement (bassins de décantation des eaux d'exhaure des installations souterraines et unités de traitement des eaux, station d'épuration des eaux usées, bassin d'orage …),
- Des verses des déblais suivant leur nature, dont une partie (matériaux calcaires) pourrait être réutilisée pour la préparation de granulats,
- Les aires de dépôt d'équipements et de matériels,
- Les voiries…

3.3.2.2 Partie nucléaire

Les principales installations sont liées aux unités de conditionnement des colis primaires en dans un conteneur de stockage et à la galerie de transfert des colis de stockage :

- Les bâtiments techniques associés à la galerie de transfert des colis (ventilation, alimentation électrique, exhaure…),
- Les installations dédiées :
  - ✓ à la réception et au déchargement des emballages de transport,
  - ✓ à la préparation et au conditionnement des colis primaires dans un conteneur de stockage,
  - ✓ aux entreposages de transit des colis de stockage conditionnés sur site,
  - ✓ à l'entreposage des hottes de transfert,
  - ✓ aux salles de conduite des procédés,
- Des entreposages modulaires de transit ou répondant éventuellement à d'autres besoins (soutien à la réversibilité, etc),
- Les installations techniques support (courants forts, courants faibles, ventilation, ateliers, magasins …),
- Les installations liées au contrôle des eaux et à la surveillance de l'environnement (bassins de rétention, unités de traitement des eaux…),
- Les aires de dépôt d'équipements et de matériels,
- Les voiries et éventuellement un terminal ferroviaire, qui pourrait notamment être utilisé pour la réception des emballages de transport de colis.

3.3.2.3 Emprise des installations

L'ordre de grandeur de la superficie requise serait d'une centaine d'hectares suivant les facteurs de site (topographie, environnement…). Un tiers de cette superficie est liée aux verses de déblais de creusement de la descenderie.

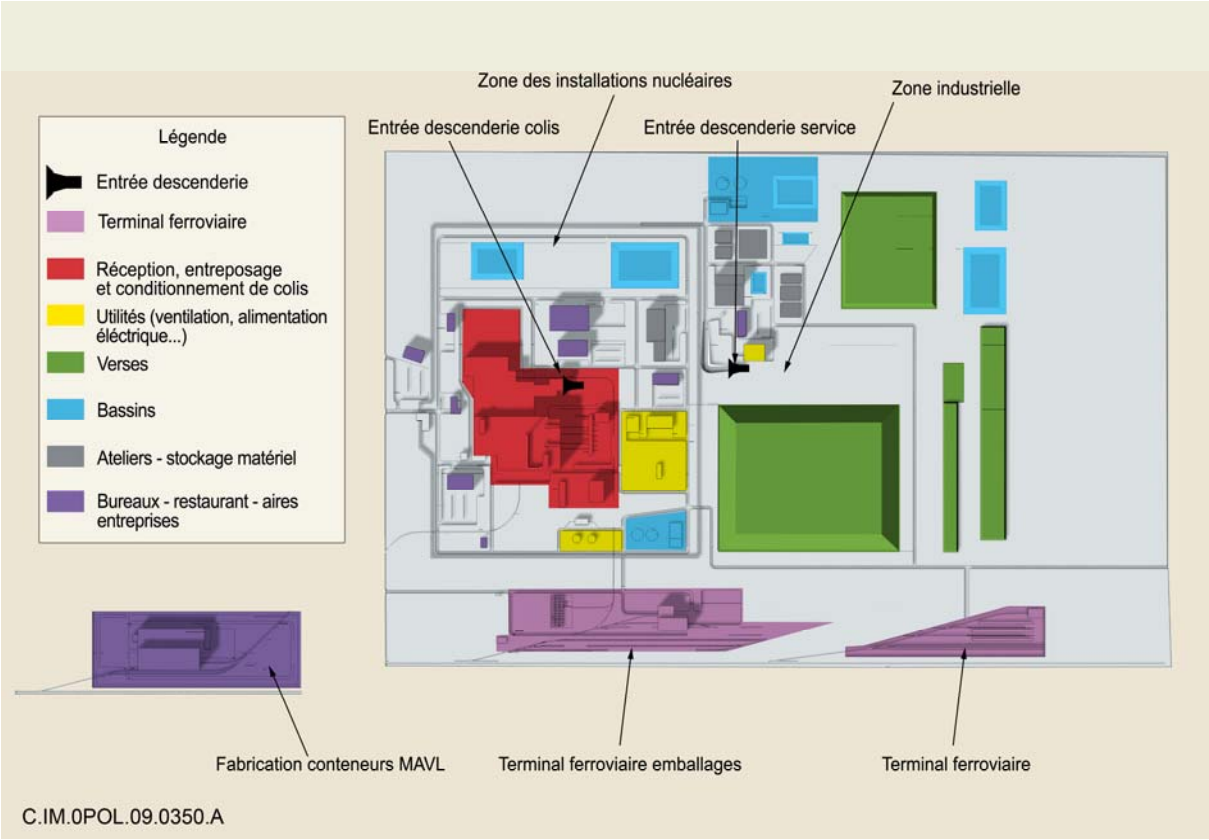


Figure 3-3 Exemple d'une zone « descenderie »

3.3.3 Les autres installations

Un certain nombre d'autres installations industrielles dont la fonction ou l'activité est liée au stockage pourraient être créées en liaison avec les activités du stockage. Elles pourraient être implantées à proximité des installations précédemment décrites. Il pourrait s'agir par exemple d'unités de fabrication des composants des conteneurs béton MAVL (corps et couvercle).

4

Architecture souterraine

4.1	*Objectifs fonctionnels*	*28*
4.2	*Options de conception*	*29*
4.3	*Les solutions présentées*	*33*
4.4	*Essais technologiques au Laboratoire souterrain*	*40*

4.1 Objectifs fonctionnels

La conception de l'architecture générale du stockage et des ouvrages de liaison et d'accès aux alvéoles de stockage est conditionnée par des considérations de sécurité, de sûreté en exploitation et après fermeture et de réversibilité, en permettant des évolutions possibles du processus de stockage. Elle doit également offrir une souplesse de gestion pour tenir compte de la diversité des déchets à stocker. Des marges de dimensionnement sont prises en compte dans le modèle d'inventaire de dimensionnement du stockage pour prendre en compte des incertitudes sur les scénarios de production de déchets, des choix de conditionnement et des choix de filière de gestion (Andra, 2009d).

4.1.1 Sécurité du travail et sûreté en exploitation

La conception de l'architecture du stockage doit intégrer la possibilité de construire des sous-ensembles du stockage alors que d'autres sous-ensembles sont en cours d'exploitation ou de fermeture. Ceci induit la concomitance d'activités d'exploitation nucléaire (transfert et mise en place des colis) et de travaux souterrains (construction, fermeture des ouvrages). Les installations doivent permettre de séparer ces activités dans l'espace ou le temps.

Pour les installations souterraines, les activités d'« exploitation nucléaire » sont caractérisées par des sujétions similaires à celles des installations nucléaires classiques. Lors des opérations courantes d'exploitation de transfert et de mise en place des colis en stockage, de maintenance et de surveillance, le personnel d'exploitation doit être protégé de l'irradiation liée aux colis. Il en est de même lors des interventions consécutives à des incidents ou à des accidents (collision, chute, incendie) qui peuvent avoir entraîné une dégradation potentielle des différentes protections.

La ventilation contribue à l'hygiène et à la sécurité dans les ouvrages souterrains : en conditions normales, la ventilation fournit au personnel une atmosphère saine ; en cas d'incendie, l'ouvrage doit permettre la mise en sûreté et/ou l'évacuation du personnel, ainsi que l'intervention des secours. La ventilation permet également d'évacuer les gaz de radiolyse ainsi que la fraction de puissance thermique des déchets non dissipée par conduction dans la roche.

Les activités de fermeture avec la mise en place de scellements et des opérations de remblayage sont des activités de génie civil, avec cependant des exigences similaires à celles prises en zone d'exploitation nucléaire pour les opérations qui se situent à proximité des alvéoles de stockage.

4.1.2 Sûreté après fermeture

La sûreté à long terme concerne d'abord la maîtrise du comportement hydraulique des ouvrages. La disposition des éléments du stockage et la possibilité d'installer des scellements dans certains ouvrages visent à s'opposer aux circulations d'eau dans le stockage ; en effet, les galeries du stockage ne doivent pas constituer un court circuit hydraulique de la formation hôte d'argilite.

Pour ce faire, les perturbations mécaniques induites dans les argilites par la réalisation des ouvrages doivent être limitées. De façon générale, l'épaisseur d'argilites potentiellement endommagées doit rester faible par rapport à l'épaisseur totale des argilites, y compris à long terme après dégradation des revêtements de galeries.

Enfin, pour limiter autant que possible l'impact d'une situation altérée à une fraction seulement du stockage, et en réduire ainsi les conséquences radiologiques potentielles, il est prévu de subdiviser le stockage en sous ensembles séparés entre eux par des scellements.

4.1.3 Développement progressif du stockage

La durée d'exploitation du stockage profond pourra s'étendre sur une période d'ordre séculaire. Cette particularité conduit à adopter une stratégie de développement progressif du stockage.

La réversibilité est associée à la souplesse de gestion des colis stockés. Elle renvoie aux trois grandes fonctionnalités que sont (i) la capacité à récupérer les colis, (ii) la capacité d'action sur le processus de stockage et (iii) la capacité d'évolution de la conception.

La pérennité des ouvrages de liaison et d'accès et des alvéoles de stockage doit pouvoir être assurée sur une durée *a minima* séculaire pour permettre d'exercer les choix de gestion associés à la réversibilité.

La flexibilité offerte par l'architecture modulaire du stockage facilite l'adaptation à des évolutions du stockage pendant la période séculaire d'exploitation. En particulier, le retour d'expérience progressivement acquis lors de la construction et de l'exploitation et les progrès techniques éventuels pourront être pris en compte pour concevoir les nouveaux modules de stockage.

La construction de nouveaux modules de stockage, ainsi que des nouvelles capacités d'entreposage éventuellement nécessaires en complémentarité au stockage, sera programmée en lien avec les chroniques de mise en stockage.

4.1.4 Prise en compte des caractéristiques des déchets

4.1.4.1 Types de déchets

La conception de l'architecture considère des zones de stockage physiquement distinctes pour tenir compte des caractéristiques propres des déchets et offrir une indépendance de gestion des différentes zones. Cette disposition doit permettre également d'éviter d'éventuelles interactions physico-chimiques à long terme entre les zones.

4.1.4.2 Caractéristiques physico-chimiques des déchets

Au sein de la zone de stockage MAVL elle-même, la diversité des déchets conduit aussi à considérer des alvéoles de stockage spécifiques en fonction de leur contenu chimique. Cela favorise la limitation du relâchement des radionucléides et leur immobilisation dans le stockage.

4.1.4.3 Caractéristiques thermiques des déchets

La conception des différents modules de stockage et leur agencement relatif dans une architecture d'ensemble vise à limiter les perturbations thermiques induites sur les installations. En particulier, les températures atteintes dans les différents composants du stockage doivent rester dans des domaines de température couverts par l'état des connaissances et par la capacité à rendre compte des phénomènes et de leurs couplages. L'acceptation des colis exothermiques à un niveau de température donné et leur arrangement au sein d'une alvéole de stockage conditionnent fortement les distances entre alvéoles et donc l'emprise des zones de stockage.

4.1.4.4 Evolutions de l'inventaire

Les architectures proposées offrent une flexibilité permettant de s'adapter à des évolutions d'inventaire. En conséquence, le nombre de modules à créer au sein d'une zone de stockage doit pouvoir être ajusté et/ou la réalisation de nouvelles zones de stockage doit pouvoir être envisagée sans remettre en cause la structure générale du stockage.

4.2 Options de conception

Les options présentées ci-après constituent une base pour concevoir l'architecture du stockage. Elles sont illustrées par des exemples et des figures qui ne doivent pas être considérées comme figées à ce stade des études. En effet, l'architecture du stockage dépendra au final de la localisation précise des installations souterraines et de surface, des solutions techniques retenues, notamment pour le transfert et la manutention des colis, des données d'inventaire et des chroniques de mise en stockage des colis.

Les options relatives à l'implantation du stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien et aux zones de stockage sont présentées en liminaire, avant de traiter celles relatives aux autres composantes qui font l'ossature du stockage (ouvrages de liaison, infrastructures).

4.2.1 L'implantation du stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien

Pour préserver, au dessus et au dessous du stockage, des épaisseurs de garde d'argilites de la formation hôte, qui constitue une barrière à la migration des radionucléides, il est retenu une implantation des alvéoles de stockage sur un seul niveau au sein de la couche du Callovo-Oxfordien. La hauteur de garde de référence, pour les options de sûreté, a été fixée à 60 mètres. Le niveau d'implantation des alvéoles de stockage correspond au niveau principal du Laboratoire. L'architecture sera adaptée au pendage de la couche dans la zone considérée pour l'implantation des installations souterraines.

4.2.2 Les zones de stockage

4.2.2.1 Les différentes zones

On considère le stockage des différentes catégories de colis dans des zones physiquement distinctes. En outre, il est tenu compte des caractéristiques des différents déchets pour leur positionnement au sein des alvéoles de stockage d'une même zone.

Pour la zone de stockage MAVL, cette approche conduit à considérer des alvéoles (ou modules) de stockage spécifiques selon le contenu chimique des déchets : présence ou non de matière organique, présence ou non de sels ou de substances susceptibles de générer une perturbation oxydante.

Cette séparation vise aussi à séparer les colis faiblement exothermiques et les colis d'enrobés bitumineux sensibles à la chaleur.

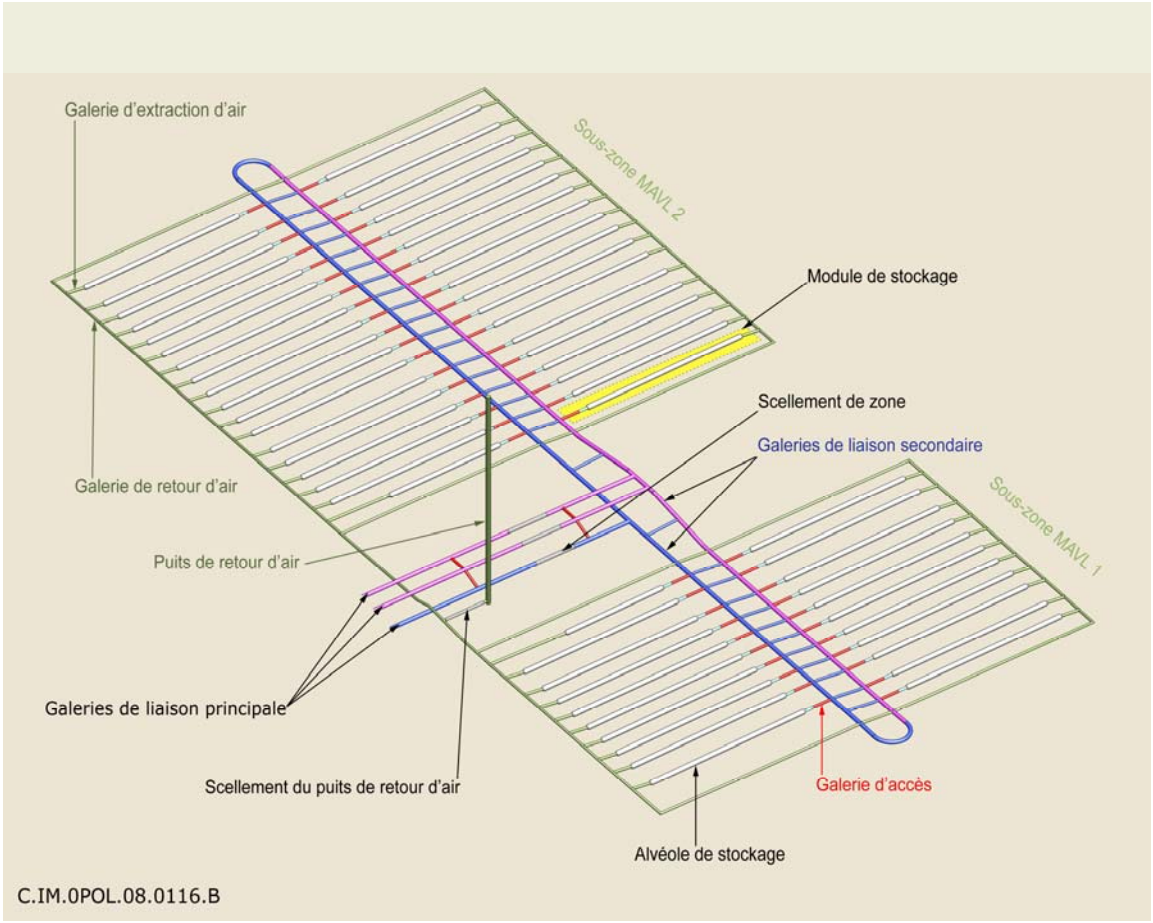


Figure 4-1 Exemple d'architecture d'une zone MAVL

4.2.2.2 Les distances entre zones

La distance minimale entre deux zones contenant des catégories de déchets différentes est définie de telle sorte qu'elle assure une indépendance phénoménologique entre elles.

Afin de limiter l'influence thermique de la zone accueillant les colis de déchets HA fortement exothermiques, la garde entre la zone de déchets HA et les autres zones de stockage est de l'ordre de 250 m.

4.2.2.3 La modularité

Pour répondre aux besoins de modularité favorisant la flexibilité et la progressivité de la construction et de l'exploitation du stockage, et à l'objectif de fractionnement lié à la sûreté à long terme, les zones de stockage sont subdivisées de façon arborescente en sous-zones, modules (de divers types) et alvéoles.

Ainsi, le besoin de flexibilité d'exploitation conduit à diviser, en fonction de l'importance de l'inventaire de colis de déchets, en un nombre plus ou moins important de « modules d'exploitation », dans lesquels l'activité d'exploitation durera en général quelques années.

La prise en compte de la sûreté conduit d'autre part à individualiser des « modules de fractionnement », en liaison avec la localisation des ouvrages de scellement.

Dans l'exemple présenté pour la zone de déchets MAVL (cf. Figure 4-1), l'ensemble « alvéole de stockage avec sa galerie d'accès et sa galerie d'extraction d'air » constitue à la fois un module d'exploitation et un module de fractionnement (puisque l'alvéole est scellée de part et d'autre lors des travaux de fermeture).

Dans l'exemple présenté pour les zones HA (cf. Figure 4-2), un module d'exploitation regroupe quelques centaines d'alvéoles desservies par un faisceau de trois galeries d'accès parallèles), ce qui représente une durée d'exploitation de quelques années. Un module de fractionnement HA comprend deux modules d'exploitation. Ceci est lié à la localisation des scellements qui sont implantés dans les galeries de liaison entre deux modules de fractionnement consécutifs.

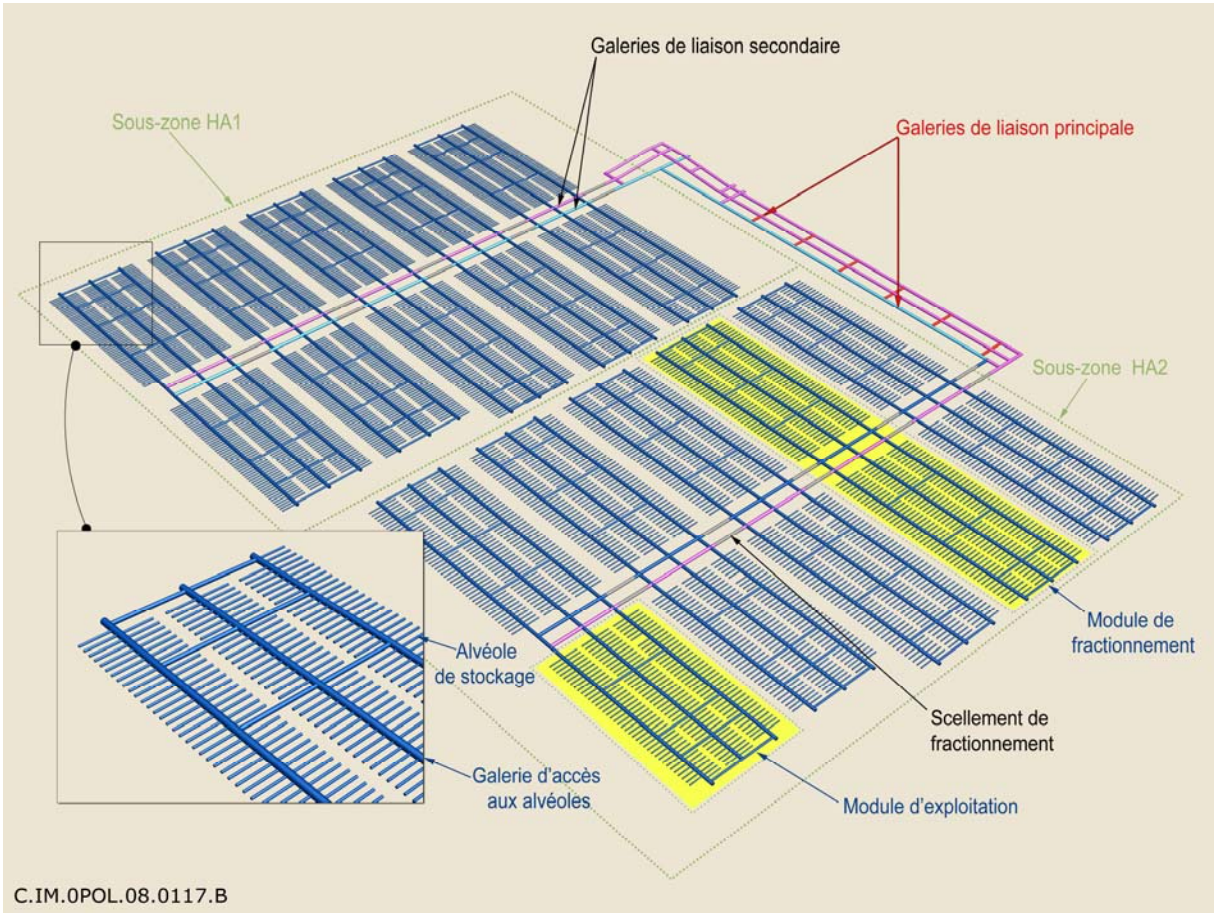


Figure 4-2 Exemple d'architecture de la zone HA

4.2.3 Les ouvrages de liaison entre les installations de surface et les installations souterraines

La liaison entre les installations de surface et les installations souterraines est réalisée par un ensemble d'ouvrages de liaison surface/fond. Leur disposition favorise la maîtrise du fonctionnement hydraulique à long terme du stockage :

- au niveau du stockage, les recettes des puits communs à l'ensemble des zones de stockage sont regroupées dans une zone d'extension limitée (« zone centrale »), autour de laquelle sont positionnées les différentes zones de stockage. Les descenderies feraient également leur jonction au niveau du stockage dans cette même zone centrale ;
- l'implantation d'un puits spécifique à une zone de stockage donnée peut permettre de simplifier la conception du système de ventilation du stockage ; on vérifie que leur implantation n'a pas d'incidence significative sur le fonctionnement hydraulique du stockage après fermeture.
- lors de la fermeture du stockage, des scellements seront mis en place dans les ouvrages de liaison surface/fond.

4.2.4 Les infrastructures souterraines au niveau du stockage

La zone centrale est reliée aux zones de stockage par des faisceaux de galeries de liaison parallèles, dont le nombre variera suivant l'importance des flux à gérer.

Dans l'exemple de la Figure 4-2, cet ensemble est hiérarchisé en galeries de liaison principales, qui relient la zone centrale aux différentes zones de stockage, et en galeries de liaison secondaires, qui se terminent en extrémité des sous- zones HA.

Pour gérer la co-activité entre les activités nucléaires et non nucléaires, le zonage des installations est conçu pour séparer physiquement les activités de travaux et d'exploitation. Ce zonage peut évoluer au cours du temps. En cas d'incident, l'architecture des infrastructures du stockage permet d'assurer l'évacuation du personnel et des recoupes fermées par des sas permettent un passage entre zones.

4.2.5 La ventilation

Le schéma général de ventilation du stockage résulte d'une analyse en fonctionnement normal et accidentel (incendie). Il est conditionné principalement par la gestion de la coactivité entre travaux et exploitation nucléaire, et la prise en compte des aspects de sûreté.

On retient un principe de séparation des circuits de ventilation de la zone « travaux » et de la zone en « exploitation nucléaire », la zone nucléaire étant en dépression par rapport aux autres ouvrages.

L'arrivée d'air est réalisée en pleine section des galeries.

4.2.6 Les ouvrages de fermeture

Les ouvrages de fermeture comprennent les scellements et remblais en galeries, puits et galeries inclinées (descenderie).

Les scellements sont des ouvrages localisés (pluri-décamétriques dans leur conception actuelle) de très faible perméabilité, pour s'opposer aux circulations d'eau. Ils sont constitués d'un noyau à base d'argile gonflante et de deux massifs d'appui en béton de part et d'autre de ce noyau (cf. chapitre 12).

Des scellements destinés à isoler le stockage de son environnement (notamment des encaissants et des niveaux perméables) sont établis dans les ouvrages de liaison surface/fond, et en redondance, dans les galeries de liaison à proximité de la base des ouvrages de liaison.

Des scellements contribuant au fractionnement du stockage (pour réduire son impact en situation altérée) sont positionnés en tenant compte de l'agencement des différents modules d'exploitation au sein de chacune des zones de stockage[10].

Hors volume occupé par les scellements, l'ensemble des puits, descenderies et galeries est remblayé. Le remblai courant assure un rôle mécanique vis-à-vis des argilites (limitation de ses déformations pour limiter l'extension des zones endommagées) ; le remblai situé à proximité des scellements de galerie (remblai d'appui) assure en outre un rôle de confinement mécanique du noyau argileux de ces ouvrages.

4.3 Les solutions présentées

4.3.1 Données d'entrée

L'inventaire des colis de déchets pris en compte pour l'établissement de l'architecture du stockage présentée dans cette section correspond au scénario de base défini dans le modèle d'inventaire (Andra, 2009d). Dans l'architecture présentée, on considère l'hypothèse d'une mise en stockage des colis HA fortement exothermiques après 60 à 70 ans d'entreposage préalable.

L'architecture correspondant au scénario de dimensionnement du modèle d'inventaire est présentée en Annexe 2.

[10] Le nombre de modules de fractionnement doit être suffisamment important pour pouvoir leur attribuer un rôle significatif. Il est considéré qu'il est au moins d'une dizaine par zone de stockage.

4.3.2 Plan d'ensemble et principaux composants

La Figure 4-3 présente un exemple d'architecture à terminaison. L'Annexe 1présente une vue en plan de cette architecture.

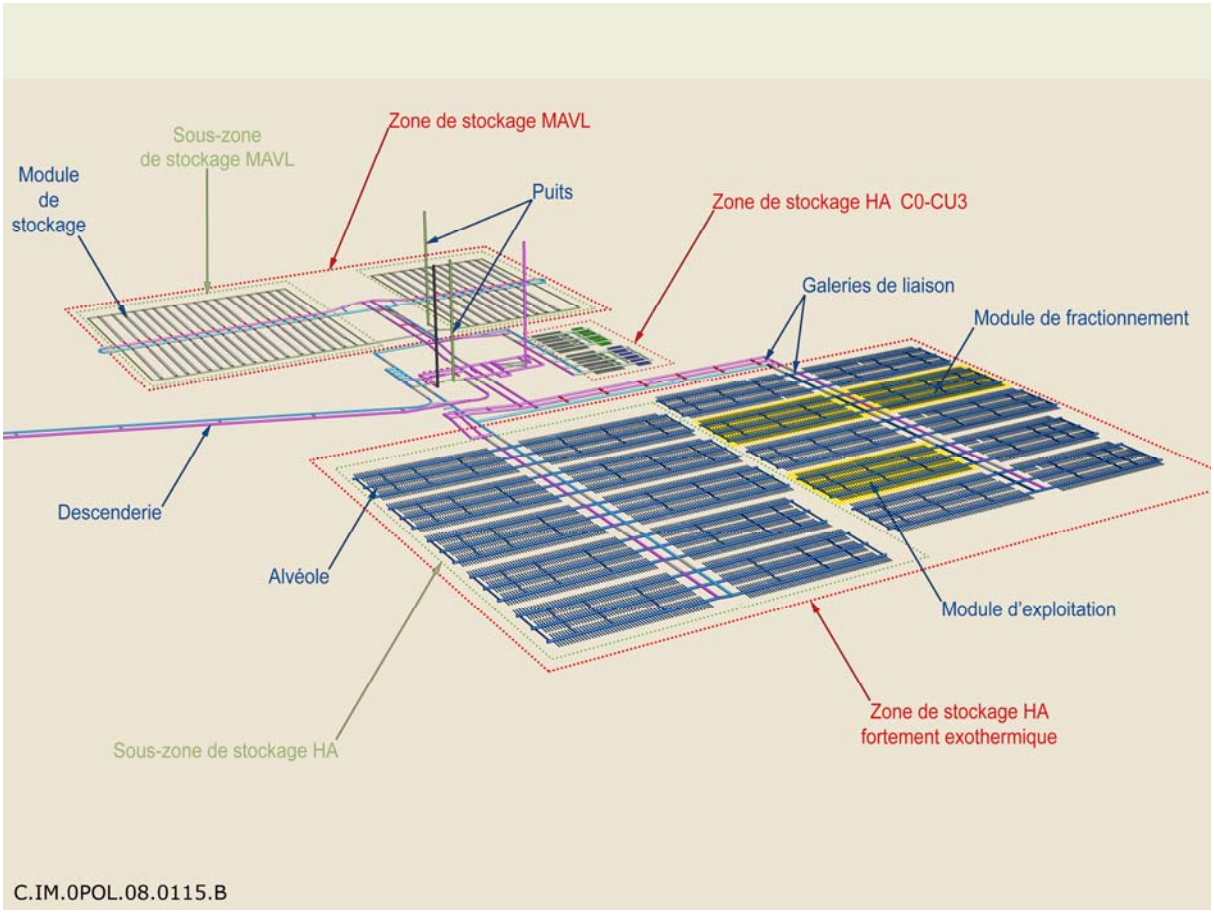


Figure 4-3 Architecture souterraine (situation « à terminaison »).

4.3.2.1 Ouvrages de liaison surface-fond

On prévoit un ensemble composé d'une descenderie double tube et de quatre puits pour gérer l'ensemble des flux à transférer :

- un tube de la descenderie est exclusivement réservé au transfert des colis ; le second tube de la descenderie assure des fonctions de service (flux de matériels et de personnel en provenance ou à destination de la zone nucléaire en surface, accès pour la maintenance de la descenderie de transfert des colis) ;
- deux puits sont réservés exclusivement au retour d'air, pour assurer l'ensemble des retours d'air et des désenfumages. Un puits est dédié spécifiquement à la zone MAVL, le second prenant en charge les autres zones de stockage et l'ensemble des infrastructures ;
- un puits de personnel et un puits de travaux assurent l'ensemble des autres flux, y compris l'alimentation des installations souterraines en air frais qui est réalisée principalement par le puits de personnel.

4.3.2.2 La zone centrale et les galeries de liaison principales

La zone centrale est organisée autour des quatre fonctionnalités suivantes :

- la réception et l'évacuation des matériaux de construction (déblais, bétons, remblais, matériels et matériaux divers) ;
- la réception des hottes de transfert des colis pleines et vides ;

- le support au fonctionnement des installations souterraines ;
- l'amenée et le retour d'air.

Les liaisons principales, dans la solution présentées, sont constituées de faisceau de 2 à 3 galeries, en fonction des flux. La section excavée de ces galeries est d'environ 60 m².

L'emprise de la zone centrale, à son extension maximale, est de l'ordre de 700 m x 300 m.

4.3.2.3 La zone de stockage MAVL

La zone de stockage MAVL est scindée en deux sous-zones. Chaque sous-zone est desservie par 2 galeries de liaison secondaires (une galerie de transfert des colis et une galerie de travaux, toutes deux de section excavée de l'ordre de 60 m²) et est entourée d'une galerie spécifique dédié au retour d'air (avec des compartiments séparés pour le retour d'air de la zone travaux et de la zone d'exploitation). Les alvéoles MAVL sont orientées suivant la contrainte horizontale majeure.

L'emprise de la zone de stockage MAVL est d'environ 3 km^2 pour le scénario de base du modèle d'inventaire.

4.3.2.4 La zone de stockage HA

La zone de stockage HA est scindée en deux sous-zones, chacune étant desservie par deux galeries de liaison secondaires (une galerie de transfert de colis et une galerie de travaux, de section excavée de l'ordre de 60 m²). Chaque sous-zone de stockage est composée d'une dizaine de modules d'exploitation, situés de part et d'autre du faisceau secondaire (5 modules d'exploitation de chaque côté).

Un module d'exploitation est constitué de trois galeries d'accès aux alvéoles, de rameaux perpendiculaires, dits « recoupes », et d'environ 300 alvéoles de stockage implantées perpendiculairement aux galeries et orientées selon la contrainte horizontale majeure. La longueur des galeries d'accès est d'environ 700 m ; la longueur des alvéoles horizontales est de 40 m. Cette disposition en triplets de galeries permet d'assurer la possibilité d'évacuer le personnel hors fumées en cas d'incendie.

Avec les durées d'entreposage préalable considérées, la zone de stockage de déchets HA s'étend sur une surface d'environ 6 km^2 pour le scénario de base du modèle d'inventaire.

4.3.2.5 La zone de stockage CO / CU3

Le stockage des déchets C0 et des combustibles usés CU3, sensiblement moins exothermiques que les autres colis HA, s'effectue dans deux modules d'exploitation de taille réduite (environ 200 alvéoles de déchets C0 et 120 alvéoles de combustibles usés CU3 réparties dans les deux modules).

L'organisation de ces modules est similaire à celle des modules d'exploitation de déchets HA fortement exothermiques. Les modules sont desservis par deux galeries de liaison (une galerie de transfert de colis et une galerie de travaux, de section excavée de l'ordre de 60 m²).

L'emprise des modules de stockage des déchets C0 et des combustibles usés CU3 est de l'ordre de 0,3 km^2.

4.3.3 La ventilation des installations souterraines

La Figure 4-4 décrit le schéma général de ventilation du stockage.

L'alimentation en air frais des installations souterraines est faite majoritairement par le puits de personnel.

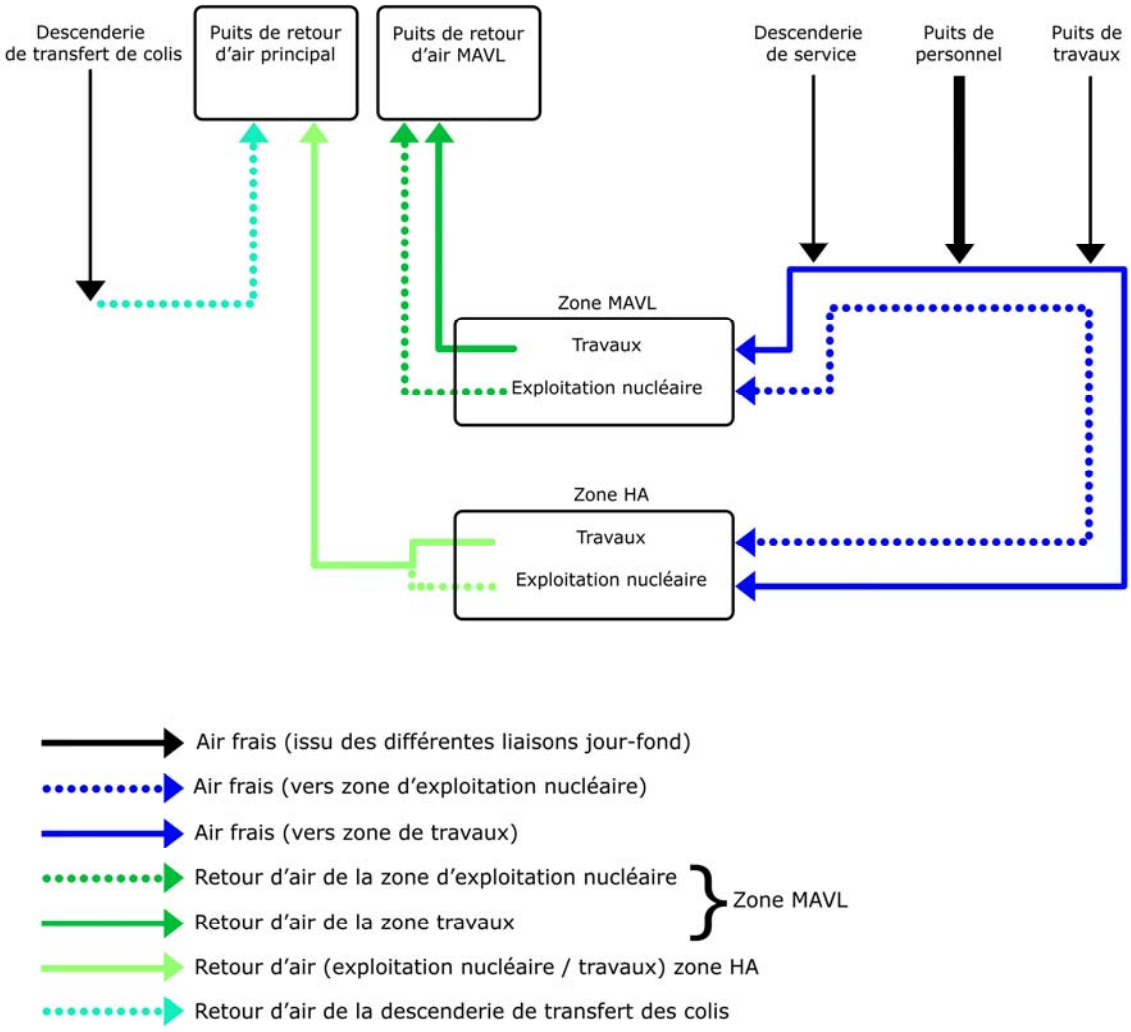
Les valeurs retenues pour la ventilation hygiénique sont issues de la recommandation R 352 du 27 juin 1990 de la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs salariés.

Le débit d'air neuf requis pour le stockage à terminaison est de l'ordre de 600 m^3/s, en prenant l'hypothèse d'une diminution du débit de ventilation dans les modules après la phase de mise en place des colis.

Le système de ventilation des chantiers d'excavation doit être équipé d'un traitement des poussières.

L'alimentation en air frais s'effectue dans des galeries en pleine section, sans conduit dédié.

Le circuit de retour d'air des zones en exploitation est canalisé dans une gaine séparée du retour d'air des zones en travaux. Dans la zone HA, il est possible d'utiliser les galeries de liaison pour le retour d'air canalisé, ce qui évite la réalisation de galeries supplémentaires. Compte tenu du gabarit des hottes MAVL, le circuit de retour d'air MAVL s'effectue dans une galerie dédiée.



C.IM.ASTE.09.0732.C

Figure 4-4 Représentation schématique de la ventilation du stockage

Dans le cas de galeries équipées d'une gaine de ventilation, celle-ci sera mobilisée pour extraire les fumées en cas d'incendie. Dans le cas des galeries non équipées de gaines de ventilation, on utilise la configuration des galeries pour pousser les fumées jusqu'à un point d'extraction. Il n'y a pas d'inversion de ventilation.

- les fumées liées à un incendie en zone « travaux » sont évacuées par les gaines (ou compartiments de galerie) du retour d'air « travaux » ;
- les fumées liées à un incendie en zone « nucléaire » sont évacuées par les gaines (ou compartiments de galerie) du retour d'air « nucléaire » ;
- un incendie en alvéole MAVL est un cas particulier pour lequel un arrêt de ventilation est prévu avec fermeture des clapets coupe-feu.

L'évacuation du personnel est prévue par une conception de l'architecture du stockage avec des faisceaux de galeries parallèles (2 ou 3) reliées par des recoupes dont l'interdistance (de l'ordre de 200 mètres) est définie pour permettre au personnel de rejoindre une galerie hors fumées. Des dispositions particulières sont à prendre lors du creusement des ouvrages.

4.3.4 Le développement progressif du stockage

La réalisation et l'exploitation progressives du stockage seront organisées par tranches successives. Les premiers travaux de construction et le démarrage de l'exploitation permettront la mise en œuvre des solutions industrielles et l'acquisition d'un premier retour d'expérience dans l'optique des travaux suivants.

Les études préliminaires de scénarios d'entreposage et de mise en stockage (Andra, 2009a) montrent la possibilité de démarrer l'exploitation avec un seul type de colis. Le nombre de types différents de colis MAVL augmentera progressivement dans le temps. Les scénarios étudiés envisagent la possibilité de débuter la mise en stockage de colis HA (de type C0) au cours de la première décennie d'exploitation.

La Figure 4-5 illustre le développement progressif de l'architecture, avec l'hypothèse d'un stockage au plus tôt des colis fortement exothermiques HA.

4.3.4.1 Construction de l'infrastructure souterraine initiale

Les liaisons surface-fond seront construites en parallèle lors de la première tranche du stockage. Dans le prolongement de ces liaisons surface fond, la réalisation de la zone centrale permettra de mettre à disposition des utilités et commodités nécessaires aux travaux souterrains.

Les conditions d'accès aux fronts de creusement limitent leur nombre et conditionnent la cadence d'avancement. Les cadences sont estimées à ce stade de manière préliminaire en tenant compte de la nature des terrains traversés, des moyens de creusement utilisés et des dispositions de soutènement à mettre en œuvre.

La réalisation de l'infrastructure souterraine initiale comprend le creusement et le revêtement des galeries mais également la pose des équipements conventionnels ou destinés à l'exploitation nucléaire (réseaux, éclairage, sas entre zone travaux et zone nucléaire…).

Des tunneliers pourraient être utilisés pour le creusement de la descenderie avec une vitesse d'avancement estimée de l'ordre de 200 à 250 mètres par mois pour la traversée des terrains sus jacents à la formation du Callovo-oxfordien. Le tunnelier devrait vraisemblablement être adapté pour pouvoir poursuivre le creusement dans les argilites, en tenant compte de la convergence de ces terrains. La prise en compte de la réalisation des ouvrages de tête, du montage et démontage des équipements de creusement conduit à une durée de travaux estimée à ce stade de l'ordre de 4 ans, hors équipement.

A partir de la recette de chaque puits et du bas des descenderies, des fronts de taille seront organisés afin de creuser la zone centrale et de boucler la ventilation. Compte tenu de la structure de la zone centrale, des longueurs limitées des galeries de liaison, des galeries d'accès et des alvéoles de stockage MAVL, la réalisation de ces ouvrages serait faite avec des machines à attaque ponctuelle.

Cependant, l'utilisation de tunneliers reste envisagée, en prolongation des descenderies ou en partant du fond, en fonction de leur efficacité dans les argilites[11].

A partir de cette zone centrale, différents fronts de creusement permettront d'étendre l'infrastructure souterraine vers les zones de stockage (MAVL, C0). Les travaux concerneront d'abord les galeries de liaison principales (galeries de transfert de colis, galeries de travaux) puis les premiers tronçons des galeries de liaison secondaires.

La distance entre les fronts de creusement et les recettes des puits augmentant, les moyens (personnels et ventilation notamment) seront adaptés aux cadences visées. Les utilités et commodités seront installées au fond afin de fournir un soutien aux équipes de creusement qui progressent dans les galeries de liaison principales puis secondaires.

Pendant cette première phase, il n'y a pas d'activité d'exploitation nucléaire.

4.3.4.2 Construction, essais et exploitation des premiers modules de stockage

Après la réalisation de l'infrastructure souterraine, les premiers modules de stockage (MAVL, C0) seront construits progressivement avant de réaliser des essais en inactif puis en actif. La mise à disposition pour exploitation des différents modules de stockage nécessitera la mise en service de tous les ouvrages associés au circuit de ventilation, dont les galeries de retour d'air liées à chacune des sous zones MAVL.

En parallèle, les travaux de construction et de mise en service d'autres modules se poursuivront ensuite en lien avec les chroniques prévisionnelles de mise en stockage. Les distances de transport au niveau du stockage, qui resteront dans un premier temps de l'ordre de 2 km pour la construction des premiers modules MAVL et C0 pourront ensuite atteindre près de 5 km lors de l'exploitation de la zone de stockage des déchets HA.

[11] De manière générale, le recours au tunnelier dans le Callovo-Oxfordien suppose des adaptations liées aux spécificités du terrain (comportement différé des argilites, grande profondeur) : des adaptations seraient nécessaires pour gérer un arrêt prolongé du tunnelier et une stratégie particulière doit être développée vis-à-vis de la pose du revêtement (pose différée ou mise en oeuvre de matériaux de remplissage entre le terrain et le revêtement). En outre, les grands rayons de courbure imposés par cette technologie induisent des longueurs supplémentaires par rapport à l'architecture de base. L'étude des possibilités d'utiliser cette technologie pour réaliser des galeries souterraines du stockage doit être poursuivie.

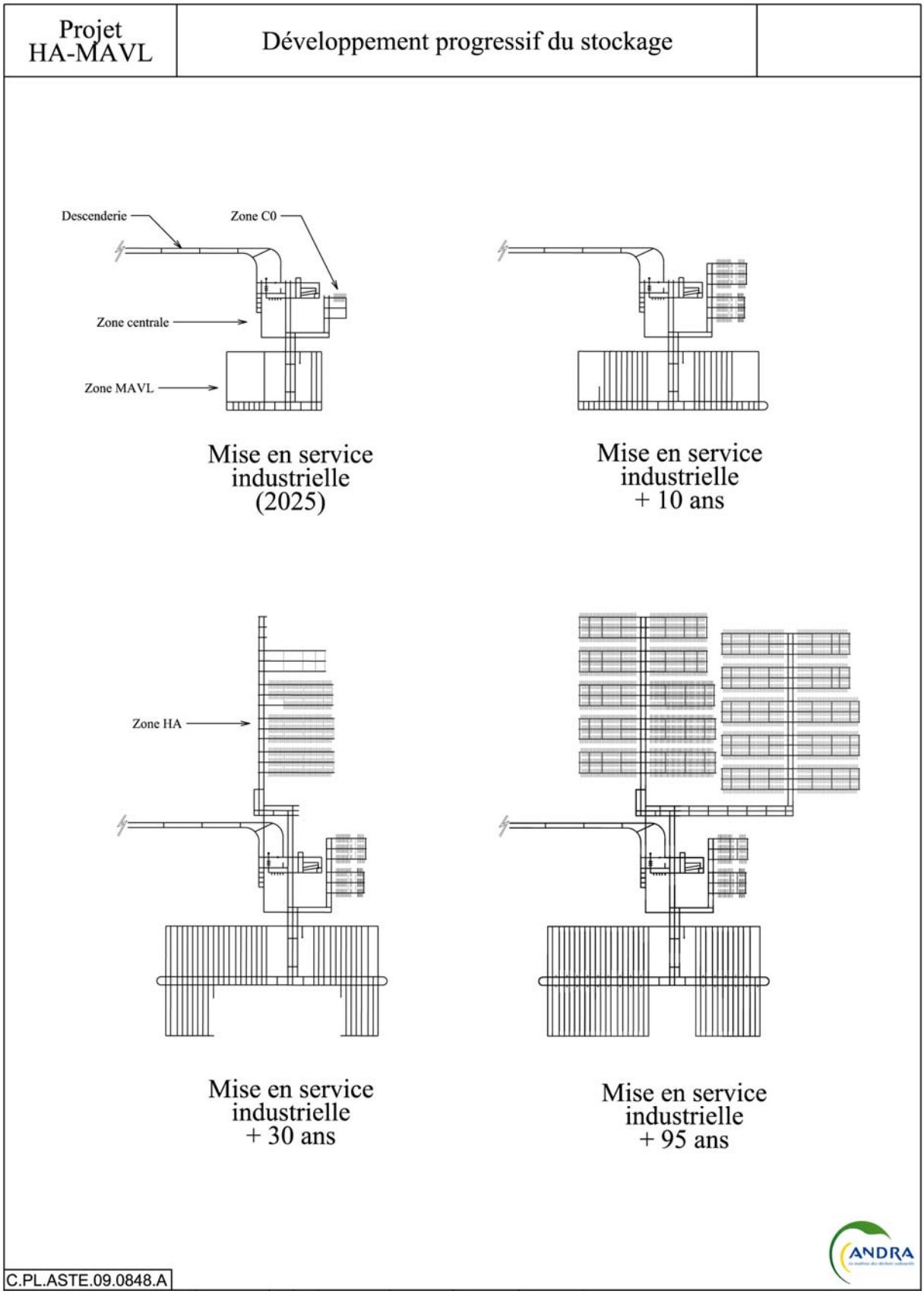


Figure 4-5 Développement progressif de l'architecture souterraine du stockage

4.4 Essais technologiques au Laboratoire souterrain

Les travaux réalisés au Laboratoire souterrain de Meuse Haute-Marne depuis 2004 ont permis de mettre au point et d'améliorer progressivement une méthode de creusement adaptée aux argilites.

La réalisation des essais doit tenir compte des contraintes opérationnelles du Laboratoire, qui ne permettent pas de réaliser des galeries exactement semblables à celles d'un futur stockage. Le gabarit d'accès dans le Laboratoire limite en effet la taille des engins de creusement et le flux d'extraction des déblais. En conséquence, les méthodes de construction sont choisies pour permettre une extrapolation aux méthodes industrielles qui pourraient être utilisées pour la construction du stockage. Les connaissances acquises sont utilisées pour dimensionner les ouvrages du stockage et décrire leur comportement.

La technique d'abattage de référence est aujourd'hui l'abattage mécanique (machine à attaque ponctuelle) du fait de sa bonne adaptation au terrain et de ses performances en matière d'endommagement de la roche et de précision de construction. La mise au point de cette méthode nécessite :

- L'adaptation des outils et de la tête de coupe au terrain,
- La mise au point d'une méthode de découpage précise,
- La mise en pratique d'un système de traitement des poussières efficace.

Au besoin, des méthodes de creusement alternatives pourraient être testées au Laboratoire souterrain après 2015.

Concernant le soutènement par boulonnage, des essais individuels de différents types de boulons ont été conduits au Laboratoire souterrain. Pour affiner la conception et la prévision du comportement des zones boulonnées, un programme d'essais a été lancé permettant d'acquérir des connaissances sur le comportement mécanique d'une galerie boulonnée dans l'argilite (déformations dans la roche, convergence en paroi, effort supporté par plusieurs boulons). Le rôle du boulonnage du front (boulons de fibres de verre) sera également étudié.

Le revêtement actuellement envisagé pour les ouvrages d'un stockage est constitué de béton sous forme d'une coque rigide. Un revêtement de type « souple » est également à l'étude, le principe étant d'accompagner les déformations du terrain pour limiter l'état de contrainte dans le revêtement. Pour réaliser ce type de revêtement, des éléments compressibles sont intégrés dans le revêtement.

Il est prévu de réaliser une galerie de conception « souple » et une galerie de conception « rigide » dans le Laboratoire sur la période 2010-2012. Ces ouvrages et la roche environnante seront instrumentés pour suivre leur comportement dans le temps.

Des essais technologiques complémentaires sont envisagés après 2015. Ils pourront notamment porter sur le perfectionnement des méthodes de construction (technologies de réalisation des carrefours, des revêtements…). Chaque essai nécessitera l'utilisation d'un tronçon de galerie particulier, instrumenté et suivi dans la durée.

5

Transfert des colis entre la surface et les alvéoles de stockage

5.1 Objectifs fonctionnels 42
5.2 Options de conception 42
5.3 Les solutions présentées 42

5.1 Objectifs fonctionnels

Les équipements de transfert des colis de stockage entre les ateliers nucléaires de surface et les alvéoles de stockage doivent assurer, en sécurité, un flux industriel correspondant aux objectifs de mise en stockage correspondant aux futures chroniques de mise en stockage.

Ces transferts s'effectuent en protégeant les personnes contre l'irradiation. L'exposition du personnel sera optimisée, dans le respect d'une dose annuelle maximale de 5 mSv/an[12].

La conception des équipements doit permettre de transférer jusqu'en surface des colis de stockage qui seraient récupérés.

5.2 Options de conception

La protection des opérateurs contre l'irradiation conduit à interposer des protections radiologiques entre les colis de stockage et le personnel. Il a été retenu de transférer les colis de stockage, depuis leur chargement dans les installations de surface jusqu'à leur introduction dans les alvéoles de stockage, à l'intérieur de hottes de transfert. Ces hottes comprennent une enceinte blindée de radioprotection dotée d'une porte et d'une structure support.

Le processus de transfert doit être adapté au choix futur d'implantation des installations de surface et des installations souterraines, à l'architecture du stockage et au flux de hottes de colis dans les galeries souterraines. Pour diminuer la section courante des galeries d'accès aux alvéoles, l'Andra a retenu l'option de deux engins différents pour l'acheminement des hottes : un véhicule pour assurer le transfert des hottes dans les infrastructures de liaison du stockage sur une distance importante puis une navette pour circuler dans les galeries d'accès jusqu'au droit des alvéoles de stockage sur une courte distance. Le transbordement entre les deux engins est réalisé à l'intersection de la galerie de liaison avec la galerie d'accès aux alvéoles en exploitation.

La conception des équipements de transfert des colis de stockage repose également sur les options suivantes :

- les incidents pris en compte dans le cadre de l'analyse de la sûreté (collision, dérive…) ne peuvent pas être la conséquence d'une seule défaillance,
- les équipements utilisés pour le transfert des hottes doivent pouvoir être libérés de leur charge (affalage) de manière à permettre les interventions hors présence de sources,
- la charge calorifique des équipements utilisés doit être réduite autant que possible, vis-à-vis du risque d'incendie.

5.3 Les solutions présentées

5.3.1 Transfert des hottes de la surface jusqu'au niveau du stockage

Les solutions proposées prennent en compte l'hypothèse d'une descenderie pour le transfert des hottes d'une pente de 10 à 12 %. Ce type d'ouvrage est couramment utilisé dans les exploitations minières.

Après le chargement en surface d'un colis de stockage dans la hotte, cette dernière est acheminée par la descenderie jusqu'au niveau du stockage. Deux solutions techniques ont été étudiées avec un véhicule automoteur et un funiculaire à câbles.

5.3.1.1 Véhicule automoteur

Description

Le principe du véhicule automoteur avec roues multidirectionnelles a été privilégié car il permet, par rapport à un véhicule articulé de type tracteur et remorque, de réduire la longueur du convoi et de tourner dans des virages de rayon de courbure plus court.

[12] Pour mémoire, la limite réglementaire est de 20 mSv/an

Le nombre d'essieux et de roues est lié à la charge transportée (dont la masse atteint 45 tonnes pour la hotte HA et 120 tonnes pour la hotte MAVL) et au niveau d'adhérence requis dans la descenderie. La longueur du plateau est adaptée aux dimensions de la hotte et au nombre d'essieux.

Figure 5-1 Véhicule de transfert des hottes HA en descenderie

Le principe de l'alimentation par lignes électriques avec frotteurs dans les galeries est envisagé à ce stade. Le principe de rails courant au plafond des galeries avec un preneur de courant fixé sur le véhicule de transport est privilégié par rapport à la solution des rails courant dans le sol, nécessitant des caniveaux ouverts de dimensions importantes avec des intersections plus complexes.

La prise en charge par soulèvement ou la dépose des hottes est réalisée par le système auto-élévateur du véhicule. Ce principe est assez communément utilisé pour le chargement de transporteur quand on veut éviter la mise en œuvre en galerie d'une unité de levage de charges lourdes (pont roulant, portique etc.).

Le véhicule comporte une cabine de conduite ; la possibilité d'aide à l'opérateur par des modes de pilotage automatique des différentes opérations du cycle de transfert est à étudier.

Le véhicule serait guidé par deux systèmes indépendants et redondants, l'un mécanique et l'autre électronique. Le premier système, comparable à celui mis en œuvre pour certains tramways sur pneumatiques, repose sur un asservissement de la direction des roues du véhicule à un palonnier orienté par des galets enserrant un rail central implanté dans la chaussée. Le système électronique interviendrait comme système de contrôle et de validation de la position du véhicule par rapport au rail de guidage.

Commentaires

La solution technique du véhicule automoteur offre une adaptabilité au tracé de la descenderie (descenderie déroulée/enroulée), en lien avec les choix d'implantation des installations de surface et des ouvrages de recette des hottes de transfert de colis au niveau du stockage. La possibilité de pouvoir disposer de plusieurs véhicules pour en assurer leur maintenance sans arrêt d'exploitation de la descenderie conforte le caractère souple de ce mode de transfert entre la surface et le fond.

Un dimensionnement préliminaire du véhicule a été réalisé (260 kW pour le transfert des hottes HA à 540 kW pour le transfert des hottes MAVL). La présence de pneumatiques induit une charge calorifique à prendre en compte vis-à-vis d'un scénario d'incendie.

Figure 5-2 *Transfert des colis par véhicule dans la descenderie du SFR (SKB – Forsmark - Suède)*

5.3.1.2 Funiculaire à câbles

Description

Le principe du funiculaire repose sur un chariot de transport et un contrepoids mus sur des rails de roulement par des câbles, en équilibre autour de poulies d'entraînement à friction.

La solution étudiée comprend :

- un chariot de transport (70t) et un contrepoids liés par des câbles tracteur-porteurs de 54 mm de diamètre,
- un roulement des équipements (chariot et contrepoids) assuré par des galets métalliques sur des rails. Des dispositifs d'anti-déraillement sont mis en place pour assurer le maintien des mobiles sur leurs rails.
- un entraînement des câbles tracteurs-porteurs par friction sur des poulies implantées en station haute de la rampe,
- une adhérence des câbles gérée au moyen de poulies et de câbles de retour de boucle, de 40 mm de diamètre, et d'un dispositif d'ajustement de la tension par un contrepoids positionné en station basse du funiculaire.

Les rails de roulement du chariot sont installés sur une structure métallique à l'intérieur de laquelle circule le contrepoids. Cette structure est posée et maintenue sur le radier de la rampe. Cette disposition permet de découpler le fonctionnement du funiculaire des évolutions du génie civil de l'ouvrage au cours du temps.

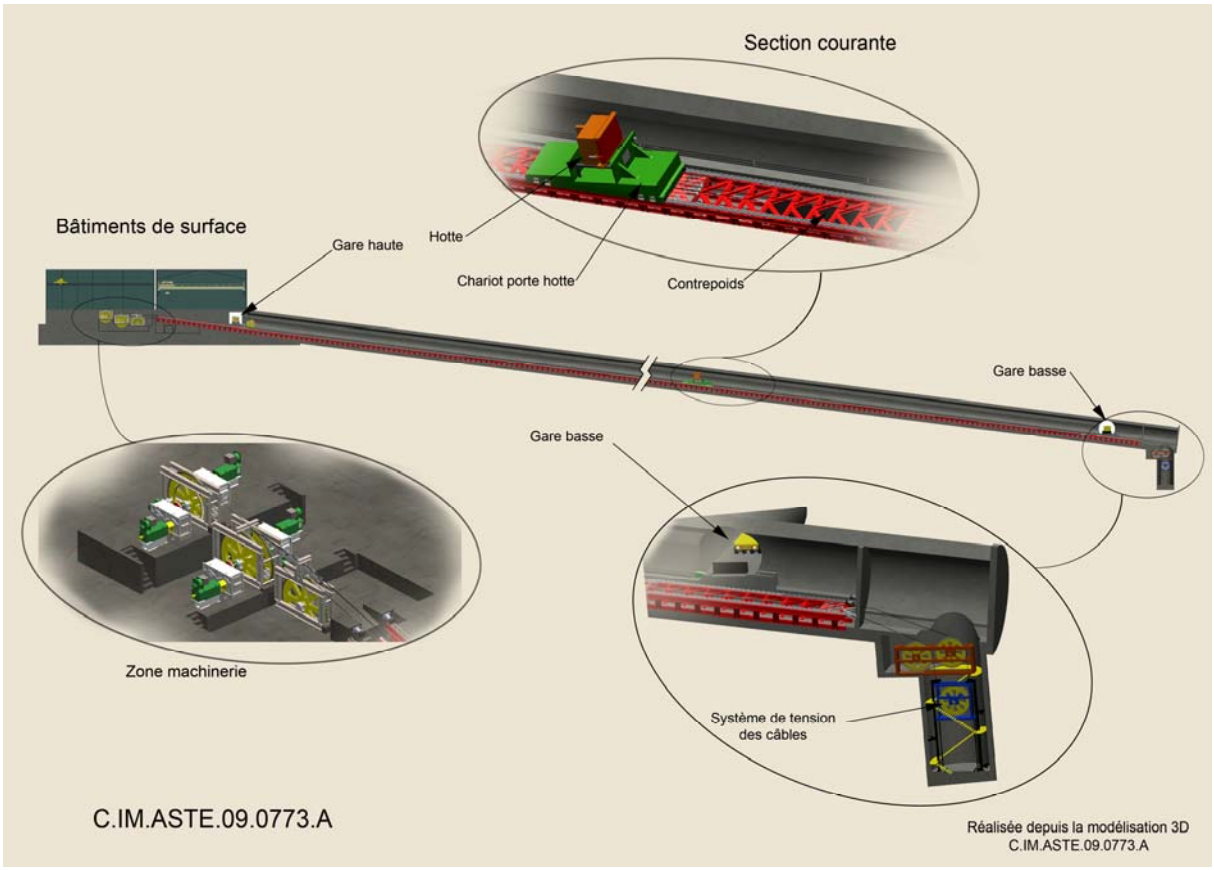


Figure 5-3 *Principes de conception d'un funiculaire de transfert de hottes HA et MAVL*

La mise en place, ou la reprise, d'une hotte de transfert sur le chariot de transport, est réalisée en stations haute et basse de la rampe au moyen d'un véhicule de transfert similaire à celui décrit dans l'option précédente. La hotte est déposée centrée sur le chariot et solidarisée au chariot par l'intermédiaire d'un verrouillage de ses pieds. Lors de ces opérations, le véhicule est piloté à distance par un opérateur situé au poste de conduite du funiculaire ou en salle de contrôle du stockage.

Le fonctionnement est entièrement automatisé à partir de la salle de contrôle.

Commentaires

Le transfert par funiculaire en descenderie bénéficie de références et d'un retour d'expérience établis pour le transport de charges très lourdes (plusieurs centaines de tonnes en écluses), à haut débit (plusieurs dizaines de kilomètres à l'heure pour le transport de personnes) et un très haut niveau de fiabilité. Pour la faible pente considérée, la limitation du déséquilibre des masses supportées par les câbles tracteurs entre le chariot de transport et son contrepoids permet la mise en œuvre de dispositifs d'entrainement et de freinage bénéficiant d'un grand retour d'expérience.

Figure 5-4 Funiculaire du plan incliné de Ronquière (Belgique)[13]

Cette solution permet de dissocier la motorisation du système, installée dans la station haute, par rapport au chariot porteur de la hotte et aux infrastructures de la descenderie. Cela permet de circonscrire les conséquences d'un incendie aux locaux « machines » implantés en surface, qui peuvent être équipés de système d'extinction à poste fixe. Enfin, le funiculaire est une solution dont l'automatisation peut s'appuyer sur de très nombreuses références.

Si un funiculaire peut être adapté à une fourchette de pente plus étendue que dans le cas d'une descenderie parcourue par un engin sur pneus, le tracé de l'ouvrage offre moins de possibilités avec une limitation sur les rayons des courbes et leur nombre. Par ailleurs, il faut noter également que la disponibilité du funiculaire est tributaire d'un programme de maintenance de l'installation qui doit être intégré dans le cycle d'exploitation.

5.3.2 Transfert des hottes au niveau du stockage

Le transfert de hottes en souterrain est étudié en deux étapes :

- La première étape consiste à acheminer la hotte, une fois arrivée au niveau du stockage, jusqu'à la zone de stockage au travers du réseau de galeries de liaison. Ce transfert est réalisé à l'aide d'un véhicule capable de transporter des charges lourdes sur des distances plurikilométriques. A son arrivée dans la zone de stockage, la hotte est déposée dans le carrefour au droit de la galerie d'accès à l'alvéole en exploitation.
- La deuxième étape, d'une longueur hectométrique, correspond au transfert de la hotte dans la galerie d'accès pour permettre son accostage sur l'alvéole en exploitation. Cette opération est réalisée à l'aide d'un équipement spécifique doté d'une grande précision de positionnement, qui est désigné par le terme « navette d'accostage ».

Le découplage du processus de transfert avec l'utilisation de deux engins différents présente plusieurs avantages. Il permet une spécialisation des véhicules aux distances parcourues, aux pentes et aux

[13] Ce funiculaire fonctionne avec 2 chariots de 5000 t à vide (5700t en charge) reliés à 2 contrepoids de 5200 t. La pente de l'ouvrage est de 5 % et sa longueur est de 1432 m.

gabarits de passage dans les ouvrages empruntés. Cette spécialisation se traduit aussi par une optimisation de la conception de chaque engin (puissance, longueur, encombrement des véhicules, giration…). Ce découplage permet également de dissocier les temps des cycles de transfert de ceux de mise en alvéole des colis : le véhicule de transfert n'est pas immobilisé pendant la phase d'accostage et de déchargement de la hotte. Enfin, la spécialisation permet, en disposant les zones de transbordement dans les croisements de galeries, de simplifier les manœuvres des véhicules dans la zone de stockage.

5.3.2.1 Transfert jusqu'à la zone de stockage (étape 1)

Dans le cas d'un transfert des hottes entre la surface et les installations souterraines par un véhicule automoteur (cf. § 5.3.1.1), il apparaît plus simple de poursuivre jusqu'à la zone de stockage avec le même véhicule.

Dans le cas du transfert par funiculaire, une reprise de hotte au pied de l'ouvrage d'accès est nécessaire pour amener celle-ci jusqu'à la zone de stockage. Dans ces conditions, le transfert de la hotte en souterrain peut se faire avec un véhicule sur pneus ou sur rails, ce qui est examiné ci-après.

Véhicule sur pneus

Le véhicule de reprise de la hotte au fond serait proche du véhicule présenté précédemment pour le transfert en descenderie (véhicule automoteur et autoélévateur doté de roues pneumatiques directionnelles, motorisation hydraulique alimentée par lignes électriques de type trolley) mais avec une motorisation moins puissante (de 160 à 190 kW).

Véhicule sur rail

Une navette de transfert électrique automotrice ou composée d'un ensemble « locotracteur avec lorry » circulant sur une voie ferrée est une seconde solution technique. La mise en place de la voie dans les galeries de liaison conduirait à disposer des aiguillages ou des rotondes (dans le cas des navettes automotrices) dans les carrefours menant jusqu'aux zones de stockage MAVL ou HA.

Cet engin n'a pas fait l'objet d'une étude détaillée à ce jour, car il correspond à des équipements existant nécessitant seulement des adaptations pour déposer et reprendre la hotte et pour limiter son emprise (plateau surbaissé).

Figure 5-5 Types d'aménagement envisageables aux carrefours des galeries de transfert (aiguillage à gauche, rotonde et croisement de voies à droite)

5.3.2.2 Transfert depuis la galerie de liaison jusqu'à l'alvéole de stockage (étape 2)

La navette d'accostage est l'équipement qui permet la reprise d'une hotte dans le carrefour desservant la galerie d'accès et qui l'achemine jusqu'à l'alvéole de stockage.

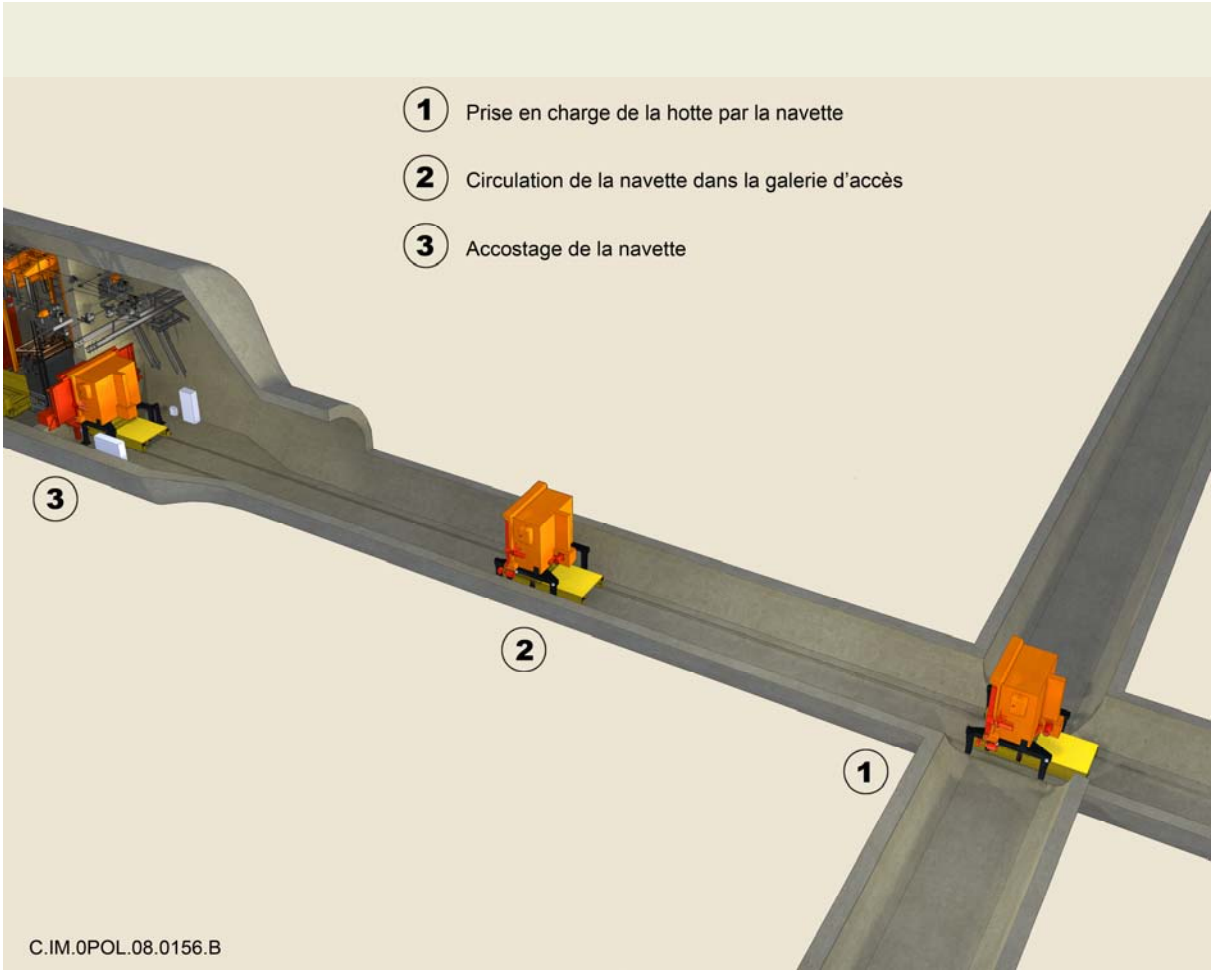


Figure 5-6 *Exemple de la prise en charge d'une hotte MAVL par la navette d'accostage*

Description

Comme dans le cas précédent, il a été envisagé des engins sur pneus et sur rails. Dans le premier cas, la navette est dotée de roues pneumatiques directionnelles pour prendre en compte une demande de grande manœuvrabilité au sein du module d'exploitation (galeries d'accès et recoupes). Dans le second, la navette est affectée à une galerie d'accès. Elle ne circule qu'en ligne droite, roule sur des rails fixés au radier de la galerie d'accès et permet une grande précision d'accostage.

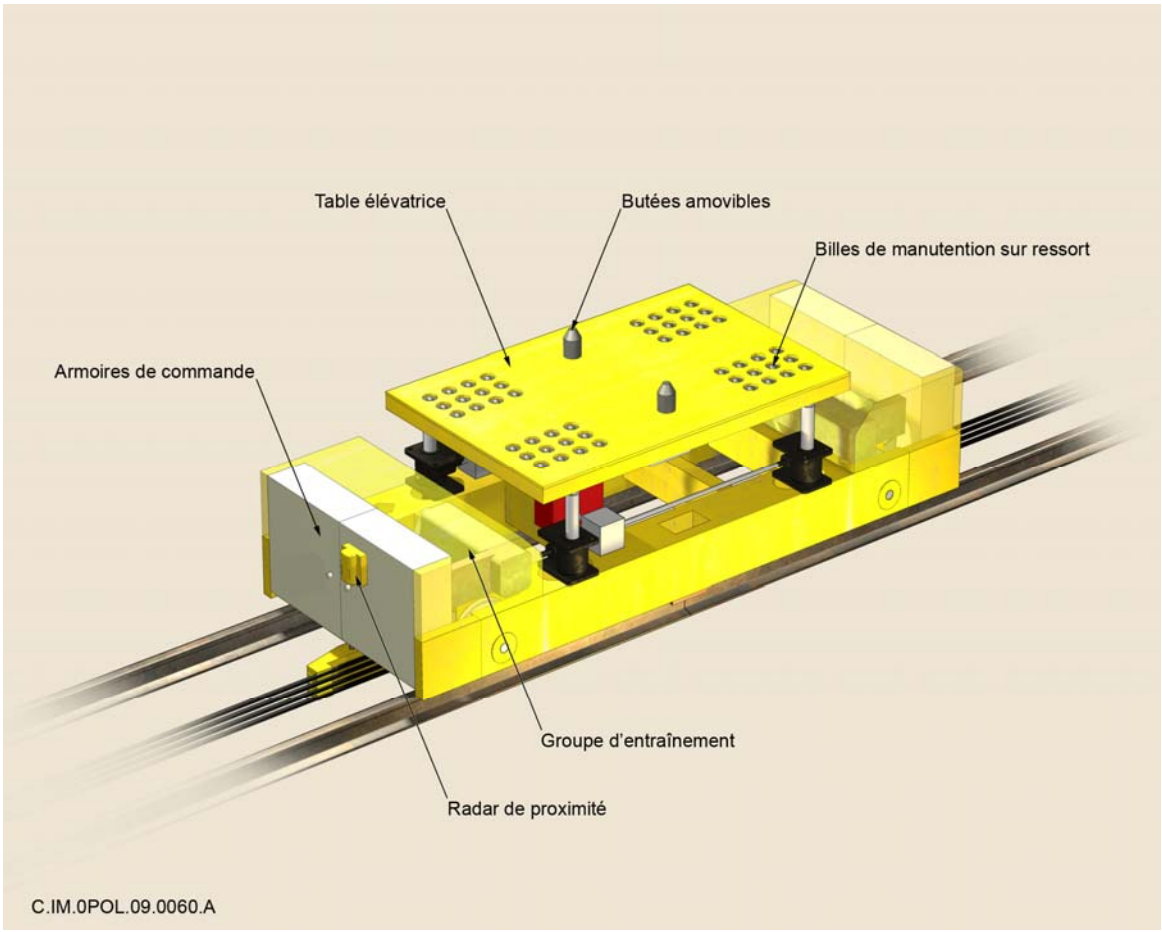


Figure 5-7 Exemple d'une navette de transfert de hotte HA sur rails

Les caractéristiques des navettes sont adaptées aux caractéristiques des hottes (de dimensions et de masse nettement plus importantes pour les hottes MAVL que pour les hottes HA) et à la distance de parcours (quelques dizaines de mètres pour la galerie d'accès MAVL) à quelques centaines de mètres pour les galeries d'accès HA).

Les principales caractéristiques des navettes sont les suivantes :

- Masse à vide de la navette : 15 tonnes
- Charge maximale : 120 tonnes (MAVL) - 45 tonnes (HA)
- Capacité d'élévation du plateau : 0,25 m,
- Performances en charge : 5 km/h,
- Motorisation électrique pour leur déplacement et le soulèvement du plateau de transport de la hotte : les batteries sont envisagées pour les courtes distances (MAVL), une alimentation par rail électrique encastré dans le radier de la galerie et par patins frotteurs installés sous la navette pour les plus longues distances (HA).
- Pilotage en mode automatique, en mode semi automatique ou, si nécessaire, en manuel au moyen d'un boîtier de commandes.

5.3.2.3 Comparaison entre les solutions techniques (véhicules sur pneus ou sur rails)

La solution mettant en œuvre des engins sur rails semble présenter des avantages intéressants par rapport aux engins sur roues pour assurer le transfert des hottes au niveau du stockage. Le niveau de sûreté acquis par leur mode passif de guidage, leur précision de positionnement minore le risque de collision. Ceci est un point important ainsi que le fait de limiter la charge calorifique au regard du risque d'incendie. De plus, par la simplicité du processus de transfert avec le transbordement en carrefour pour l'échange de hotte, l'automatisation de cette séquence du transfert apparaît envisageable, en se référant à des analogues nucléaires et industriels existants.

6

Conteneur de stockage MAVL

6.1	*Objectifs fonctionnels*	*52*
6.2	*Options de conception*	*52*
6.3	*Les solutions présentées*	*53*
6.4	*Essais technologiques*	*55*

6.1 Objectifs fonctionnels

Le choix de placer les colis primaires de déchets MAVL dans un conteneur de stockage est motivé par les objectifs suivants :

- Simplifier les processus d'exploitation face à la grande diversité des colis de déchets : leur regroupement dans des conteneurs de stockage de plus grande capacité réduit les flux d'objets manutentionnés dans les alvéoles, notamment pour les colis primaires de faible volume, tout en restant compatible avec les possibilités de transfert à l'intérieur du centre de stockage ; de plus, le complément de colisage standardise les dimensions et limite de ce fait les modes de mise en place de ces objets,
- Faciliter la récupération éventuelle de colis dans le cadre de la réversibilité, en particulier en conservant son aptitude à la manutention sur une période a minima séculaire.

Ses autres objectifs fonctionnels sont de :

- Protéger le colis primaire de déchets : (i) en fonctionnement normal, par sa tenue mécanique pour la manutention et le gerbage, et (ii) en fonctionnement accidentel (principalement vis-à-vis de la chute ou de l'incendie),
- Minimiser les vides résiduels dans l'alvéole de stockage et contribuer ainsi à limiter dans le temps les déformations dans la formation des argilites du Callovo-Oxfordien,
- S'adapter aux spécificités des déchets conditionnés pour contribuer aux fonctions de sûreté du stockage avec leurs spécificités (évacuer les gaz de radiolyse, résister le cas échéant au gonflement des enrobés bitumineux, contribuer à la sûreté-criticité du stockage pour les déchets contenant des radionucléides fissiles, dissiper la chaleur résiduelle dégagée par les déchets faiblement exothermiques …).

6.2 Options de conception

Les options de conception du conteneur sont présentées relativement au regard de trois aspects fondamentaux (la forme géométrique, le matériau et les dimensions et masse) et de l'ensemble de la chaîne logistique du stockage.

6.2.1 Forme du conteneur de stockage

Les conteneurs sont de forme parallélépipédique. Celle-ci permet de répondre plus favorablement à l'objectif de compacité et de minimisation des vides. La régularité du jeu compris entre les conteneurs une fois stockés permet de limiter le taux de vide. Par ailleurs, le conteneur de stockage est un objet massif, sans vides intérieurs autour des colis primaires, hormis les jeux nécessaires à leur mise en place.

6.2.2 Matériau constitutif du conteneur de stockage

Le béton a été retenu comme matériau pour le conteneur de stockage. Il s'agit d'un matériau se prêtant à une utilisation en grand volume, à la fois résistant et de densité relativement faible. Il permet le remplissage des vides entre les colis primaires.

On notera que l'environnement alcalin réalisé par un béton apparaît globalement favorable à la limitation du relâchement de radionucléides vers le milieu géologique. Cela suppose néanmoins d'en limiter le pH à 12,5. La formulation doit par ailleurs limiter la quantité d'eau et de matières organiques contenues dans le béton, au regard notamment du mécanisme de radiolyse.

Enfin, le choix du béton assure une intégrité mécanique sur une durée *a minima* séculaire au regard d'un éventuel retrait des colis.

Pour le cas particulier des déchets MAVL vitrifiés, une alternative à cette option pourra être étudiée à l'avenir évitant la présence d'une grande quantité de ciment au voisinage du verre. Cette alternative portant sur la conception du conteneur (et de l'alvéole) viserait à favoriser le confinement des radionucléides par le verre.

6.2.3 Dimensions et masse

Les conteneurs permettent de réduire fortement le nombre d'objets à gérer en souterrain et de minimiser les flux de transfert en alvéole. Pour ce faire, les colis primaires sont autant que possible regroupés dans un même conteneur de stockage.

6.2.4 Transfert depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage

Le conteneur de stockage n'est pas dimensionné pour assurer la protection biologique vis-à-vis de l'exposition externe aux rayonnements. Le transfert dans les infrastructures du stockage est fait dans une hotte assurant la protection radiologique[14]. Les caractéristiques (dimensions, masse) des conteneurs doivent être adaptées à l'ensemble des moyens associés au transfert depuis la surface jusqu'à l'alvéole de stockage.

6.2.5 Manutention et mise en place en alvéole

La conception des conteneurs est menée en cohérence avec celle de leurs moyens de manutention et de mise en place en alvéole. Le dimensionnement des alvéoles de stockage et les conditions dans lesquelles ils seront stockés, notamment leur nombre d'empilement, pèsent aussi directement sur la conception des conteneurs.

6.3 Les solutions présentées

Pour couvrir la grande diversité des déchets MAVL de l'inventaire, il a été défini une conception générique, mais des variantes de conception principalement orientées sur la partie interne du conteneur de stockage et son mode de fermeture sont aussi considérées.

6.3.1 Conception générique

La conception générique consiste à réaliser un conteneur de stockage constitué de deux éléments préfabriqués en béton armé : un corps et un couvercle.

Le corps est doté de cloisons internes qui ménagent des logements ajustés à la forme des colis primaires. Dans ce cas, le jeu entre le diamètre intérieur de chaque logement et le diamètre extérieur du colis primaire est suffisamment grand (jeu fonctionnel) pour assurer la mise en place des colis primaires et suffisamment petit (faible vide résiduel) pour ne pas nécessiter de comblement après la mise en place du colis primaire.

Le couvercle est emboîté et fixé sur le corps par des vis. L'interface est assurée par un joint sec, ce qui simplifie les opérations de fermeture du conteneur de stockage en évitant l'emploi de matériaux cimentaires en environnement radioactif.

Les conteneurs sont adaptés à une mise en stockage « individuelle » ou à une mise en stockage « après pré empilage » (cf. chapitre 8). Le premier type permet la manutention de colis dont la masse est de l'ordre de 7 à 15 tonnes. La manutention par pré-empilage permet de manutentionner des colis de masse plus importante, pouvant atteindre 25 tonnes. Les colis sont empilés sur deux ou trois niveaux dans les alvéoles de stockage, et ont un mode de préhension par le dessous.

[14] Pour des colis faiblement irradiants, la possibilité de ne pas utiliser de hotte sera examinée au cas par cas.

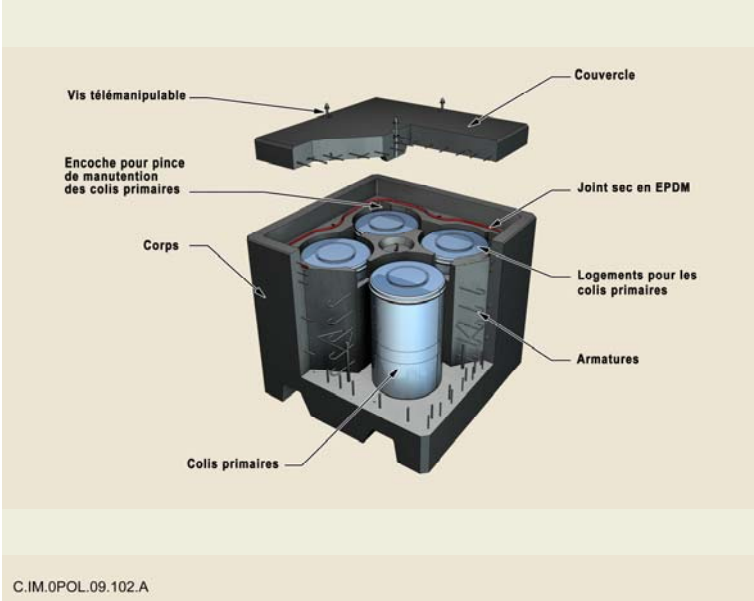


Figure 6-1 *Conteneur de stockage associé à une manutention « individuelle »*

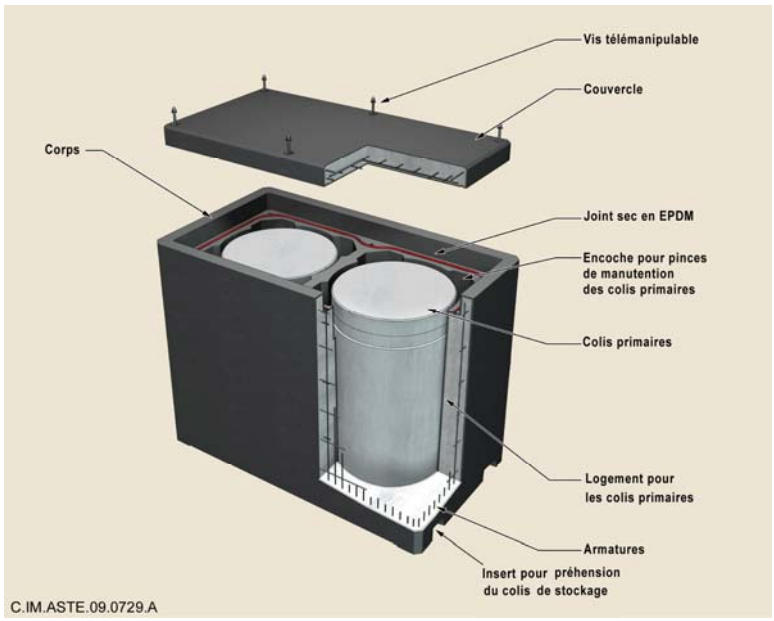


Figure 6-2 *Conteneur de stockage associé à une manutention « avec pré-empilage »*

6.3.2 Variantes de conception

D'autres conceptions de conteneurs sont également considérées pour prendre en compte des situations spécifiques :

- Un conteneur avec couvercle « coiffant » (retombant sur les faces latérales) afin d'optimiser le volume de stockage interne dans le cas de certains primaires dont le mode de préhension induirait beaucoup d'espace vide dans la conception générique.
- Un conteneur sans logements internes, mais dont les vides résiduels seraient comblés par d'autres dispositions de remplissage, pourrait répondre à l'existence de colis de déchets avec des formes complexes et/ou en faible quantité au sein de l'inventaire MID 2009.

De plus, des conteneurs de stockage pourraient être réalisés sur les sites producteurs. Cette solution est étudiée notamment pour des fûts bitume entreposés à Marcoule par le CEA. Dans ce cas, eu égard

aux installations existantes sur site, ces opérations peuvent conduire à définir des variantes de conception des conteneurs et, notamment, couler des matériaux cimentaires autour des colis primaires pour combler les vides ou assurer la fermeture des conteneurs.

6.4 Essais technologiques

Les résultats d'une première campagne d'essais ont été présentés dans le Dossier 2005. Une nouvelle campagne d'essais de fabrication a débuté en octobre 2009. Elle concerne des conteneurs béton à l'échelle 1, destinés à accueillir deux colis types B3.1.2, associés à une manutention avec pré-empilage. Les enseignements résultant de la fabrication de cette série de conteneurs et des essais de chute associés devraient être disponibles au cours de l'année 2010.

Figure 6-3 *Vue d'un conteneur type B3.1.2 (à l'envers après démoulage) avec noyau du moule en arrière plan*

Figure 6-4 *Vue intérieure du conteneur B3.1.2 avec les logements des colis de déchets et les évidements pour le passage des pinces*

7

Alvéole de stockage MAVL

7.1	*Objectifs fonctionnels*	*58*
7.2	*Options de conception*	*58*
7.3	*Les solutions présentées*	*59*
7.4	*Essais technologiques*	*62*

7.1 Objectifs fonctionnels

Du point de vue de la sûreté à long terme, les alvéoles de stockage MAVL contribuent aux fonctions ou exigences suivantes :

- Retarder et atténuer la migration des radionucléides, en préservant une épaisseur d'argilite au dessus et en dessous de l'alvéole qui constitue une barrière de diffusion,
- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser en apportant un environnement alcalin favorable à l'insolubilisation ou à la rétention de certains radionucléides,
- Protéger la roche hôte en limitant les perturbations mécaniques induites dans la roche au voisinage ; le caractère limité des perturbations chimiques dans les argilites est également vérifié.

Pour les déchets contenant des radionucléides fissiles, la géométrie de l'alvéole de stockage et l'arrangement des colis doivent assurer durablement la sûreté / criticité.

Pour les déchets faiblement exothermiques, la chaleur doit être dissipée de manière à limiter la température à des niveaux acceptables pour préserver les performances des matériaux.

Du point de vue de la sûreté en phase d'exploitation et de la réversibilité, la stabilité de l'ouvrage doit être assurée sur une période a minima séculaire. Les gaz produits par une partie des colis doivent pouvoir être évacués pendant l'exploitation. Les personnes doivent pouvoir être protégés contre l'irradiation. Enfin, une récupération des colis doit être possible pendant la période de réversibilité.

7.2 Options de conception

L'alvéole est une galerie horizontale. Elle est située en partie médiane de la couche d'argilites (avec une garde d'une soixantaine de mètres au dessus et en dessous de l'alvéole - cf. Figure 7-1). L'horizontalité de la galerie évite le risque de dérive des engins de manutention et favorise la stabilité des empilements de colis.

Le revêtement de la galerie est en béton. L'aménagement de la galerie limite les vides résiduels autour des colis après leur mise en place dans l'alvéole.

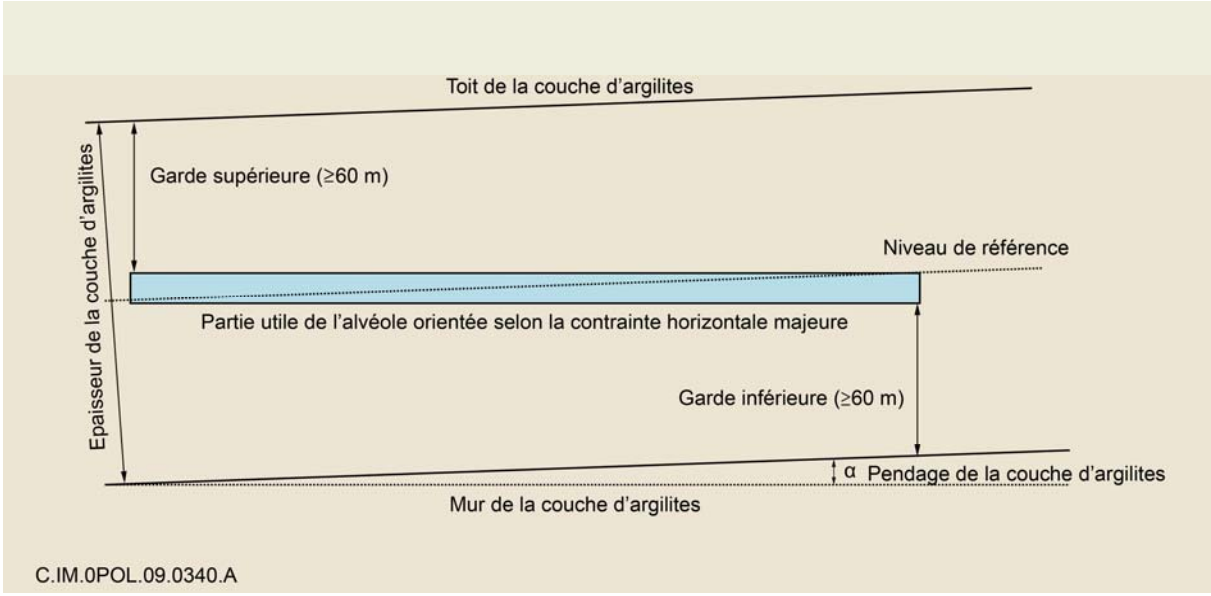


Figure 7-1 Position de l'alvéole MAVL dans la couche d'argilite

L'implantation de scellements doit être prévue aux extrémités de l'alvéole pour contribuer au fractionnement du stockage vis-à-vis de la sûreté à long terme.

La partie de l'alvéole de stockage recevant les colis est irradiante, ce qui limite le volume excavé global du stockage. Elle n'est pas accessible au personnel, qui est protégé par des portes assurant la protection biologique.

7.3 Les solutions présentées

7.3.1 Description de l'alvéole

L'alvéole de stockage est reliée d'un côté à la galerie d'accès (qui rejoint la galerie de liaison menant à la zone centrale du stockage) et de l'autre côté à la galerie d'extraction d'air (qui rejoint la galerie puis le puits de retour d'air).

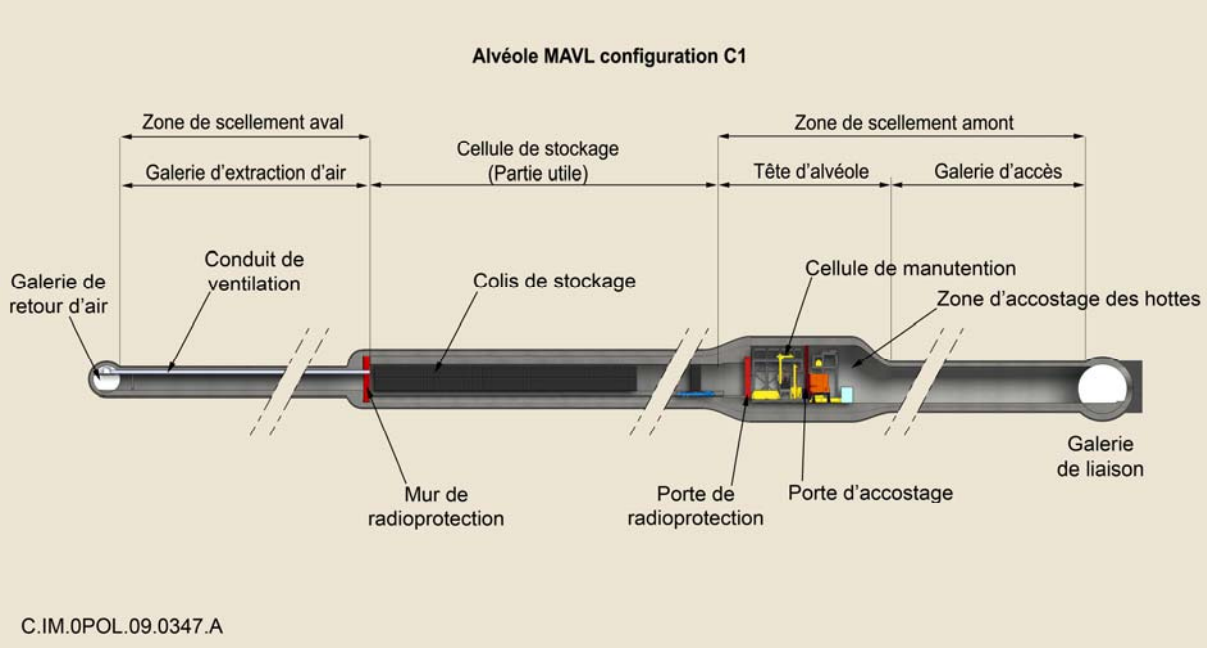


Figure 7-2 Schéma du module de stockage MAVL

A l'entrée de l'alvéole est située la zone d'accostage des hottes. Le colis de stockage est introduit à travers cette porte d'accostage dans la cellule de manutention. Le colis (ou la pile de colis) est ensuite transféré à travers une seconde porte « séparative » pour être déposé dans la cellule de stockage (cf. Figure 7-2).

L'accès au personnel dans la cellule de manutention n'est autorisé que pour la maintenance en l'absence de colis.

En termes de caractéristiques dimensionnelles, la solution de référence est une alvéole de diamètre excavé de 8 à 9 mètres dans sa partie utile (cellule de stockage). Une longueur d'environ 400 m apparaît compatible avec la conservation des gardes d'argilites précitées (cf. Figure 7-1) et avec les possibilités de commande à distance des équipements de mise en stockage des colis. L'alvéole est orientée favorablement par rapport au champ de contraintes mécaniques naturelles.

La chambre de stockage, de section rectangulaire, est adaptée à la géométrie parallélépipédique des conteneurs (cf. Figure 7-3). Ceci permet de limiter les vides et de maîtriser l'évolution de la structure de l'alvéole dans le temps et, en conséquence, la perturbation des argilites.

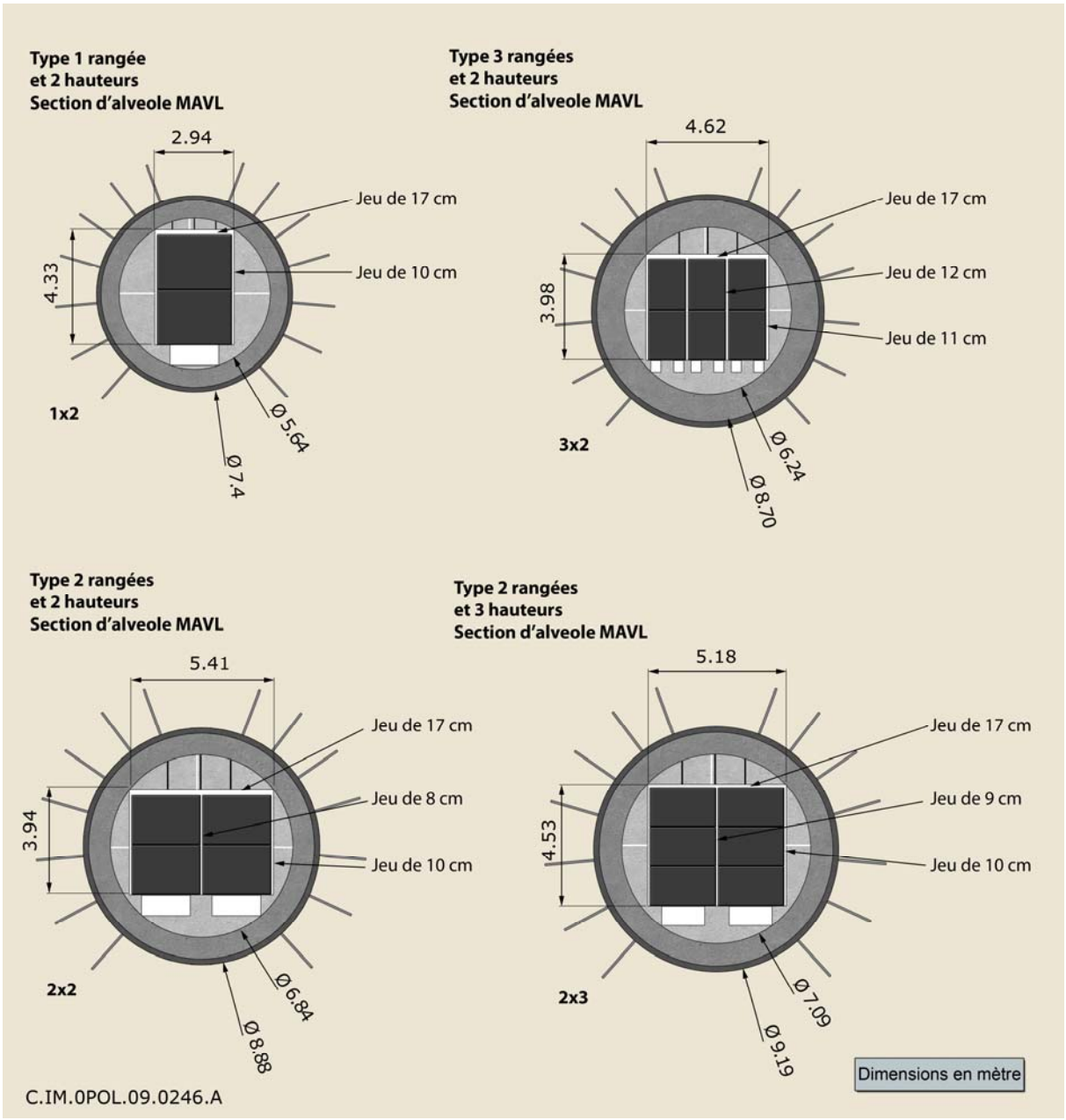


Figure 7-3 Exemples d'arrangement de colis de stockage dans une alvéole MAVL

La stabilité de l'alvéole et la limitation de la perturbation du terrain sont assurées par trois composants qui agissent à des échelles de temps différentes. Le soutènement permet d'assurer la sécurité du chantier de construction de l'alvéole. Le revêtement, de forme circulaire à ce stade des études, garantit la stabilité de l'ouvrage pendant une durée séculaire. Un béton de remplissage permet de constituer une chambre de stockage rectangulaire à l'intérieur de ce revêtement afin de limiter le taux de vide.

Le soutènement envisagé est constitué d'une combinaison de béton projeté d'épaisseur 20 cm, de fibres métalliques ou de grillage et de boulons courts (2,4 m). Le revêtement est constitué de béton non armé dont l'épaisseur est fonction de la section excavée (55 cm à 85 cm pour des diamètres excavés de 6 m à 9 m à 560 m de profondeur). C'est un béton à haute performance, coulé en place, avec un délai de 6 mois à un an après le creusement de l'alvéole de manière à permettre un déconfinement partiel du terrain.

Le soutènement et le revêtement ont été dimensionnés suivant les règles de l'ingénierie pour la conception d'un ouvrage de durée séculaire, en se plaçant dans la plus haute catégorie de durée

d'utilisation qu'elles prévoient (catégorie 5 de l'Eurocode 0) et en retenant des coefficients de sécurité prudents.

Le système de ventilation doit assurer un balayage d'air aussi homogène et complet que possible de l'ensemble des jeux autour des colis. Il doit pouvoir être maintenu en cas d'évolution anormale de l'alvéole. Parmi les différentes options examinées en 2009 pour ventiler l'alvéole, l'Andra privilégie une conception robuste vis-à-vis d'une exploitation séculaire.

L'entrée d'air s'effectue à une extrémité de l'alvéole par la cellule qui assure aussi l'accueil de colis à stocker ou le cas échéant la restitution de colis retirés. Cette cellule est fermée par deux portes blindées qui protègent en permanence les opérateurs intervenant dans la galerie d'accès. L'air est extrait à l'autre extrémité de l'alvéole par un conduit de ventilation situé dans une galerie accessible au personnel pour assurer la maintenance et les contrôles.

Après le remplissage de l'alvéole, des blocs de béton sont mis en place pour constituer un mur de protection radiologique et permettre la dépose des équipements qui seront réutilisés pour un nouvel alvéole. Ce mur de protection permettrait le cas échéant de rééquiper l'alvéole dans l'hypothèse d'une opération de retrait.

7.3.2 Construction de l'alvéole

Compte tenu de la section (50 à 60 m^2 environ) et de la longueur limitée de l'alvéole (400 m environ), il est envisagé un creusement par machine à attaque ponctuelle. La première phase est le creusement de l'alvéole en pleine section, les deux autres phases sont le coulage du radier, puis de la voûte. Chaque phase est complétée sur toute la longueur de l'alvéole avant le passage à la phase suivante. Il est à noter qu'un diamètre excavé supérieur à 9 m serait plus complexe avec probablement une excavation en deux phases successives : le creusement de la demi-section supérieure, puis le creusement de la demi-section inférieure.

7.3.3 Exploitation de l'alvéole

Les équipements et les procédures de manutention des colis de stockage (cf. chapitre 8) sont conçus pour limiter les risques d'accidents et éviter une dispersion de substances radioactives.

Des scénarios d'accident (chute, incendie) ont fait l'objet d'études de simulation pour différents types de colis de stockage associés à deux modes de mise en place (après pré-empilage ou individuellement). Ces études ont montré que le conteneur béton assurait un rôle de protection et que les colis primaires de déchets restaient intègres sans perte de confinement.

Les études menées conduisent à considérer un classement des alvéoles MAVL en classe de confinement C1 (cf. Figure 7-2). L'air extrait en fond de l'alvéole est évacué par une gaine jusqu'en surface via le puits de retour d'air de la zone MAVL.

Une réflexion a néanmoins été menée sur l'éventualité d'une classification dans la classe de confinement supérieure C2. Dans cette hypothèse, cela nécessiterait l'installation d'un système de ventilation (ventilateur, gaine, registre de soufflage…) garantissant que l'alvéole est en dépression de 80 à 100 Pa par rapport à son espace environnant, soit la nécessité d'un sas du côté de la galerie d'accès et du côté de la galerie de retour d'air. Cela se traduirait aussi par l'installation d'un étage de filtres industriels à l'introduction d'air et d'un étage de filtration « très haute efficacité » (THE) à l'arrière de l'alvéole[15]. De telles dispositions rendraient plus complexes la configuration du réseau d'aérage et induiraient des opérations supplémentaires de maintenance (filtres…).

[15] L'unité de filtration serait installée dans la galerie d'extraction d'air, au plus près de l'alvéole.

7.3.4 Scellement de l'alvéole

Les scellements positionnés de part et d'autre de l'alvéole de stockage dans la galerie d'accès et dans la galerie d'extraction d'air sont similaires à ceux des galeries d'infrastructure. Ils sont constitués d'un noyau d'argile gonflante, de coupures hydrauliques (saignées) et de massifs d'appui en béton.

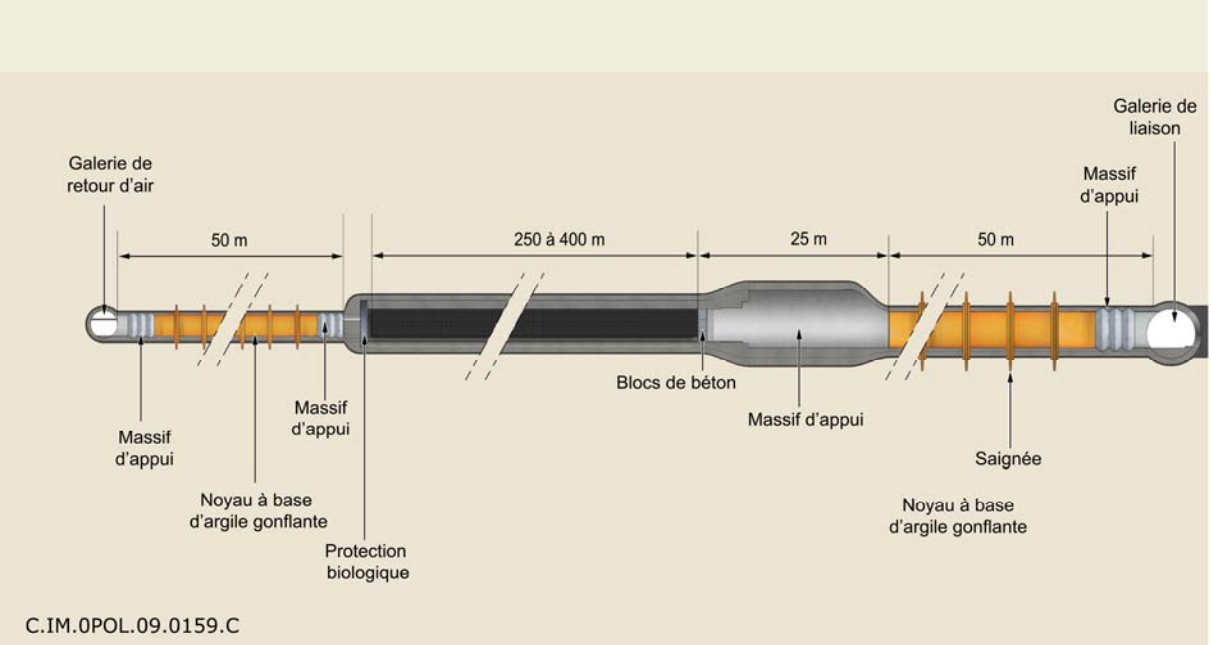


Figure 7-4 Alvéole MAVL scellée

7.4 Essais technologiques

La définition de la longueur de l'alvéole nécessitait de s'assurer de la faisabilité de la transmission sans fil à l'aide d'une technologie fondée sur la radiofréquence en souterrain, dans des conditions proches de celles du stockage. Des essais préliminaires ont été réalisés en septembre 2009 sur une distance supérieure à 400 mètres (longueur de l'alvéole de stockage) dans le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel (cf. Figure 7-5). Ils ont permis de valider la solution technique envisagée. Ces essais doivent être complétés en 2010 avec le test d'équipements adaptés spécifiquement au projet Andra.

Vis-à-vis du creusement, les enseignements acquis ou à acquérir au Laboratoire souterrain sur les galeries (cf. Chapitre 4) s'appliquent aussi aux alvéoles MAVL qui sont de section comparable. En complément, les spécificités de l'aménagement de l'alvéole pourront conduire à tester la réalisation du radier et de la chambre interne, à qualifier les tolérances d'exécution et à tester la mise en place du système d'instrumentation.

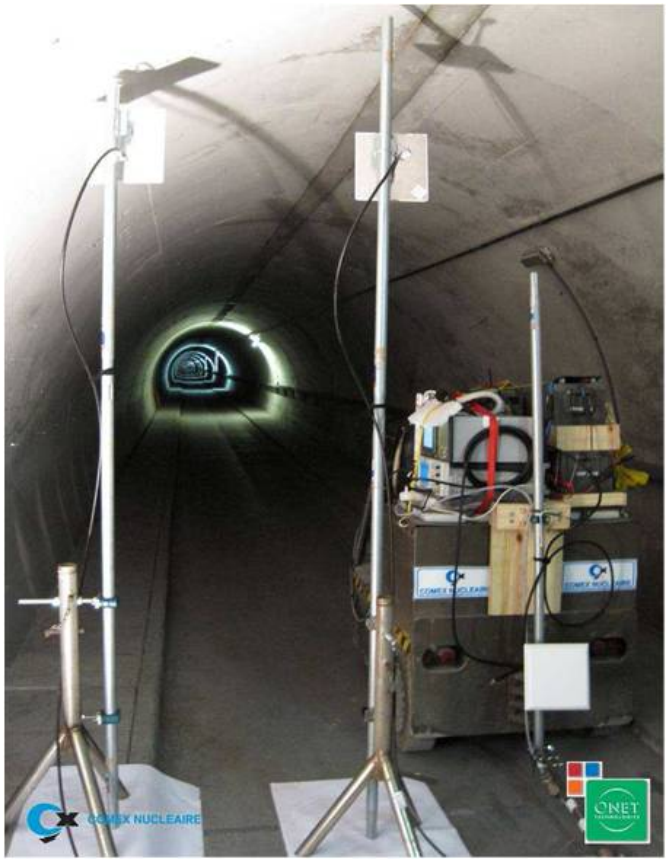


Figure 7-5 *Essais de contrôle commande d'un chariot par radiofréquence dans la galerie d'essais du LSBB (Rustrel – 2009)*

8

Manutention des colis MAVL dans les alvéoles de stockage

8.1	*Objectifs fonctionnels*	*66*
8.2	*Options de conception*	*66*
8.3	*Les solutions présentées*	*66*
8.4	*Essais technologiques*	*75*

8.1 Objectifs fonctionnels

Les équipements de manutention des colis de stockage doivent assurer leur mise en place dans les alvéoles et leur retrait, le cas échéant, en assurant un flux industriel correspondant aux futures chroniques de mise en stockage.

Ces transferts s'effectuent en protégeant les personnes contre l'irradiation. L'exposition du personnel sera optimisée, dans le respect d'une dose annuelle maximale de 5 mSv/an.

Les vides résiduels autour des colis de stockage dans les alvéoles doivent être minimisés. Cela contribue à protéger la roche hôte de déformations mécaniques à long terme. Cet objectif doit néanmoins rester compatible avec la possibilité de retirer les colis de l'alvéole.

Les équipements doivent pouvoir empiler les colis de stockage présentés, sans altérer leur intégrité et celle des alvéoles.

Vis-à-vis de la sûreté des opérations, un volet dimensionnant des équipements de manutention est l'objectif de réduction du risque de chute de colis et d'incendie.

8.2 Options de conception

Après transbordement d'une hotte de transfert sur une navette d'accostage, la hotte est acheminée jusqu'à l'alvéole. L'enceinte de radioprotection de la hotte est translatée pour s'accoster à la porte de l'alvéole de stockage (cf. 7.3.1.).

Dès lors, la conception des équipements de mise en alvéole des colis de stockage (cf. § 6.3) repose sur les options suivantes :

- les incidents pris en compte dans le cadre de l'analyse de la sûreté ne peuvent pas être la conséquence d'une seule défaillance,
- en situation accostée et verrouillée à une alvéole de stockage, la continuité de la radioprotection entre la hotte et l'alvéole doit être assurée pour permettre l'ouverture des portes de l'une et l'autre et pour autoriser la mise en alvéole, ou le retrait, d'un colis de stockage,
- la protection radiologique du personnel, lors des opérations de mise en stockage, est obtenue par la présence d'une cellule de manutention des colis, en tête d'alvéole, constituée d'un double système de portes blindées (cf. Figure 7-2),
- l'évacuation des sources présentes dans la cellule de manutention doit être possible dans toutes les circonstances de manière à permettre l'accès du personnel dans la cellule,
- les équipements utilisés pour le transfert et la mise en place des colis, qui évoluent dans la partie utile de l'alvéole, doivent pouvoir être libérés de leur charge et ramenés dans la cellule de manutention pour intervention.
- les équipements doivent être conçus pour évoluer en milieu irradiant (choix des matériaux, écrans de protection),
- la charge calorifique des équipements utilisés doit être réduite autant que possible vis-à-vis du risque d'incendie.

8.3 Les solutions présentées

Deux modes de manutention permettant la mise en place des colis dans les alvéoles de stockage et leur retrait éventuel, ont été étudiés :

- la manutention de piles de colis, les piles étant montées à l'entrée de l'alvéole (ou démontées dans le cadre d'une récupération de colis), permet de stocker des colis de dimensions et masses importantes (jusqu'à 25 t),
- la manutention individuelle des colis, est adaptée à des colis de stockage de dimensions et de masses plus réduites (jusqu'à 15 t).

Ces deux modes de manutention se complètent pour couvrir la diversité de l'inventaire des colis de déchets MAVL.

On décrit dans la suite le processus de mise en place des colis pour chacun de ces deux principes puis le processus de retrait.

8.3.1 Mise en place des colis après pré empilage

Le processus de mise en place des colis repose sur un pré-empilage des colis en tête d'alvéole, dans la cellule de manutention, suivi d'une translation horizontale de la pile de colis avec un chariot porteur jusqu'à l'emplacement de stockage.

L'ensemble des équipements comprend :

- des équipements de manutention des colis avec principalement l'unité de levage de type pont roulant qui a pour fonction de former la pile de colis par gerbage à laquelle est associé une table de réception,
- le chariot porteur qui se déplace sur des rails encastrés dans le radier du génie civil de l'alvéole de stockage. Il comprend dans sa partie centrale un plateau élévateur actionné hydrauliquement, qui permet de soulever une pile de colis d'environ 50 mm puis de la reposer en appui sur des longrines, en configuration de stockage. Les besoins en énergie électrique sont fournis par des batteries embarquées rechargeables. Le moyen de communication permettant son pilotage et la supervision des opérations à partir d'une salle de conduite déportée est assuré par un système sans fil utilisant la technologie des ondes transmises par radiofréquence,
- un transbordeur (plancher mobile) pour diriger le chariot porteur vers une des deux voies de stockage ; après ouverture des portes séparant la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole, le chariot porteur pénètre dans l'alvéole.

Le cycle se décompose en plusieurs étapes (cf. Figure 8-1) :

1. La hotte est accostée par la navette sur la porte guichet de l'alvéole. Après ouverture de ses portes, la mécanique d'extraction de la hotte pousse le colis et le livre sur le plateau de la table de réception dans la cellule de manutention.
2. L'unité de levage (pont) reprend le colis et le dépose sur le support d'empilement. L'opération de gerbage du deuxième (et éventuellement du troisième colis) s'effectue suivant la même procédure. En fonction des résultats de l'analyse de sûreté, cette opération pourrait être accompagnée par un plateau suiveur qui maintiendrait un jeu inférieur à 150 mm sous le colis pour assurer une hauteur de survol limitée.
3. Le chariot de transfert se place sous la pile de colis constituée pour la prendre en charge par-dessous, et la transfère sur le plancher mobile qui va se positionner en face de la voie de stockage choisie par l'opérateur de conduite (ce dispositif n'est pas spécifique au processus avec pont).
4. Les portes coulissantes permettant l'accès à la partie utile de l'alvéole sont ouvertes et le chariot avec la pile de colis y pénètre. Pendant le trajet, la pile de colis est en appui sur des butées afin de donner une bonne stabilité à l'ensemble roulant. Arrivé à proximité du front de colis déjà stockés, le chariot ralentit progressivement et enclenche l'opération d'approche et de positionnement. Il s'avance à très petite vitesse avec l'avant passant sous la pile déjà déposée. Il positionne sa charge au plus près de cette dernière, avec un jeu d'environ 100 mm et dépose alors la pile transportée sur les longrines.
5. Le chariot fait marche arrière, franchit les portes coulissantes qui sont ensuite refermées et revient à vide dans la cellule de manutention.

Chaque étape du cycle est réalisée de façon automatique. Le passage d'une étape à la suivante nécessite la validation manuelle par l'opérateur qui contrôle le bon déroulement de l'ensemble du processus.

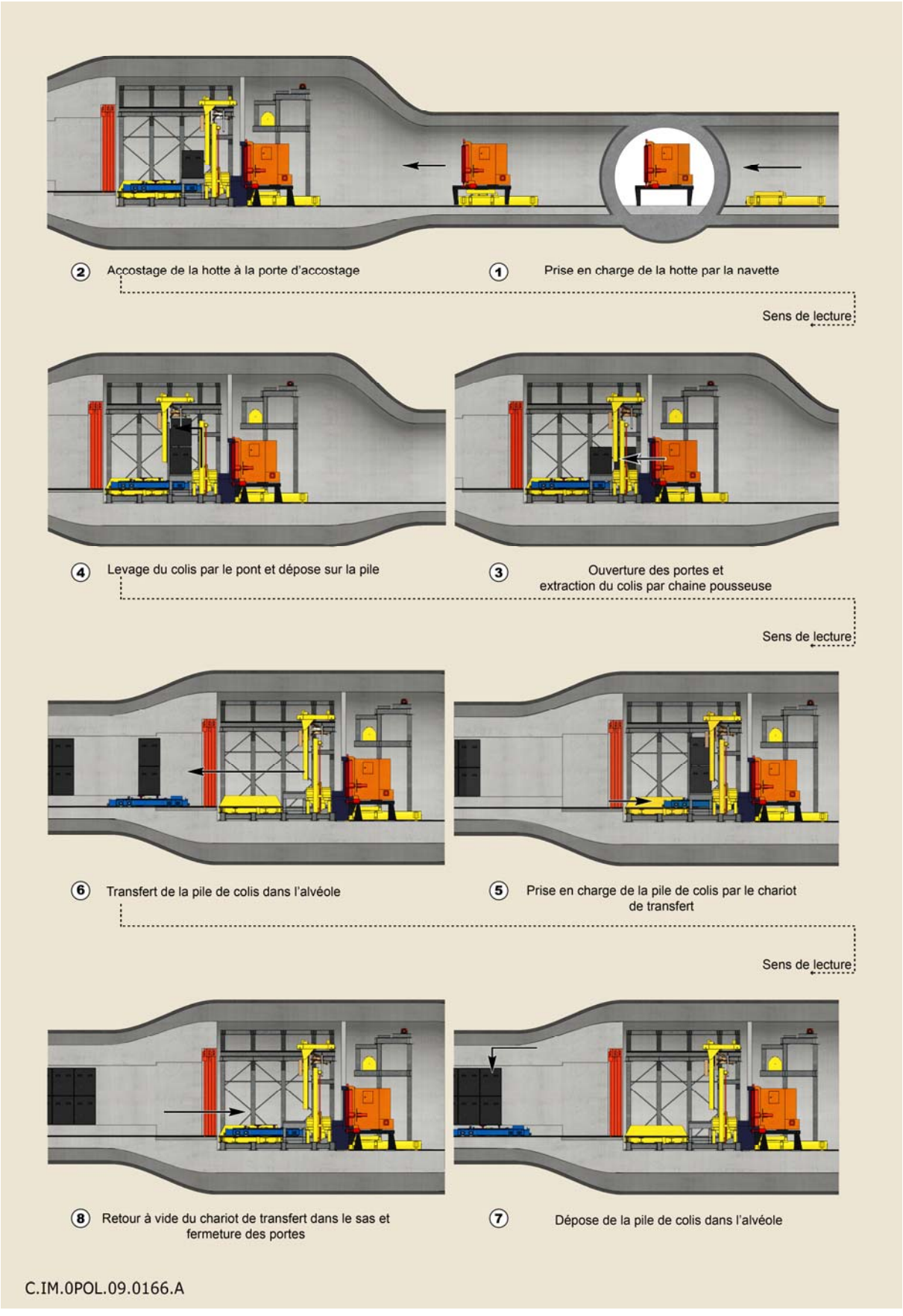


Figure 8-1 Synoptique du processus de mise en place des colis

8.3.2 Mise en place individuelle des colis

Le principe de mise en place des colis repose sur une manutention individuelle des colis jusqu'à leur emplacement de stockage.

Ce concept a été développé suivant deux solutions qui se distinguent par le mode de remplissage de l'alvéole :

- le gerbage d'une pile de colis dans l'alvéole est assuré par un chariot élévateur à fourches (« stockeur ») qui roule dans des rigoles implantées dans le radier de l'alvéole,
- la mise en place des colis par couches successives est réalisée par un « pont gerbeur » qui se déplace comme un pont roulant classique sur des corniches implantées en partie supérieure des parois verticales de l'alvéole.

Description du processus avec stockeur

L'ensemble des équipements comprend :

- le stockeur assure un mouvement de translation pour son déplacement dans l'alvéole ainsi qu'un mouvement de levage pour le gerbage des colis. Il présente une structure composée de deux sommiers parallèles et un mât qui intègre l'outil de préhension par fourches et son guidage (cf. Figure 8-2). Les sommiers sont équipés de galets circulant sur des rails encastrés dans le radier du génie civil. La motorisation du chariot est implantée en partie arrière des sommiers, comme les batteries et l'ensemble du contrôle commande. La fonction levage est assurée par un système constitué de deux treuils à câbles indépendants et redondants. Cette technologie est similaire à celle utilisée sur les ponts roulants nucléarisés équipant des cellules irradiantes du site Areva de La Hague,
- des portes blindées en amont et en aval de la cellule de manutention,
- des équipements annexes complémentaires qui permettent de dérouler le processus, dont un transbordeur (plancher mobile) équipé d'une plaque tournante. Il permet d'orienter le stockeur devant la hotte pour la prise en charge du colis puis après retournement, de le présenter face à une des voies de stockage dans l'alvéole.

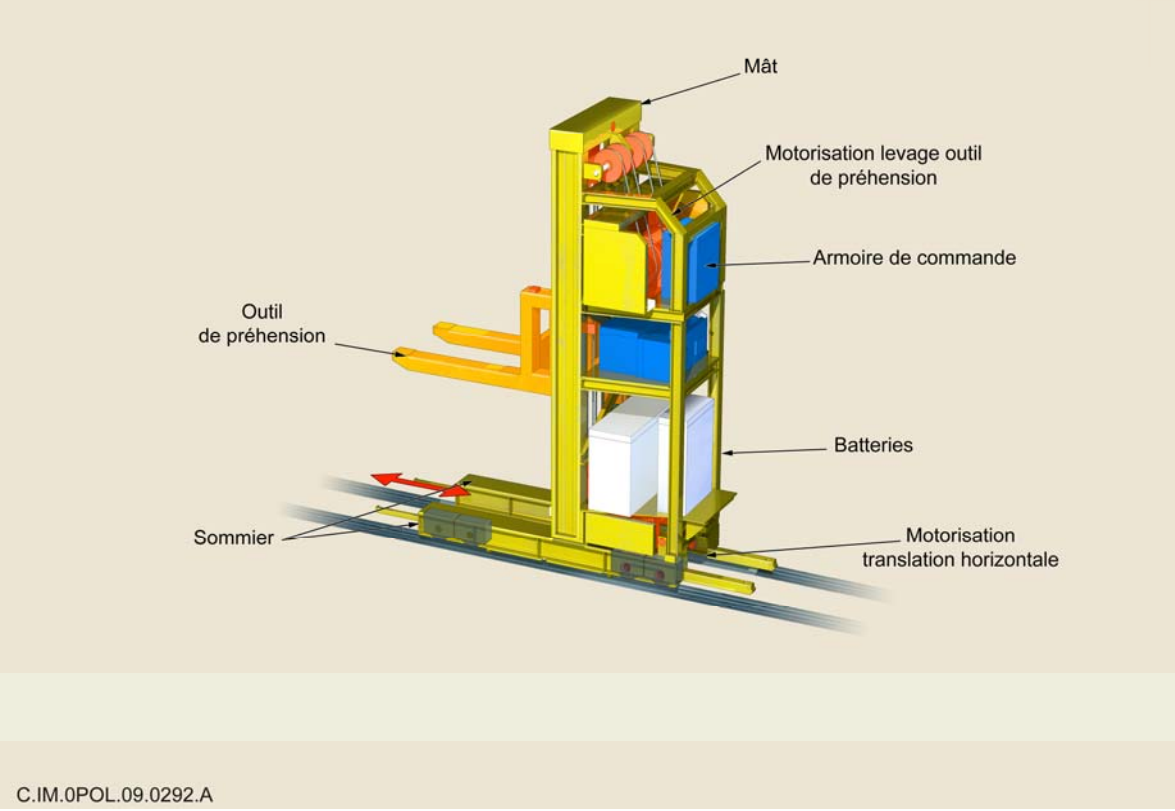


Figure 8-2 Vue du chariot élévateur à fourches (stockeur)

Le cycle se décompose suivant les étapes suivantes :

1. La hotte est accostée par la navette sur la porte guichet de la cellule de manutention. Le stockeur peut alors extraire directement le colis de stockage.
2. Après fermeture de la porte du guichet, le plancher mobile équipé d'une table tournante fait subir au stockeur une rotation de 180° et le translate pour se présenter face à la voie de stockage sélectionnée.
3. Les portes coulissantes sont ouvertes et le stockeur pénètre alors dans l'alvéole. Pendant le trajet dans la chambre de stockage, le colis est en position basse afin d'éviter tout risque de chute et de donner une bonne stabilité à l'ensemble roulant. Arrivé à proximité du front de colis déjà stockés, le stockeur s'arrête progressivement pour permettre d'enclencher les opérations de mise en place du colis. Le colis est soulevé à la hauteur correspondant à son niveau de dépose. Le stockeur s'avance ensuite à très petite vitesse et dépose le colis sur la pile.
   L'opération de dépose est sécurisée par un ensemble de capteurs redondants, indépendants et faisant appel à différentes techniques de mesures. La cohérence d'ensemble est gérée au niveau de l'automate de sécurité.
4. Le stockeur fait marche arrière et revient à vide fourches baissées dans la cellule de manutention. Les portes coulissantes sont alors refermées.

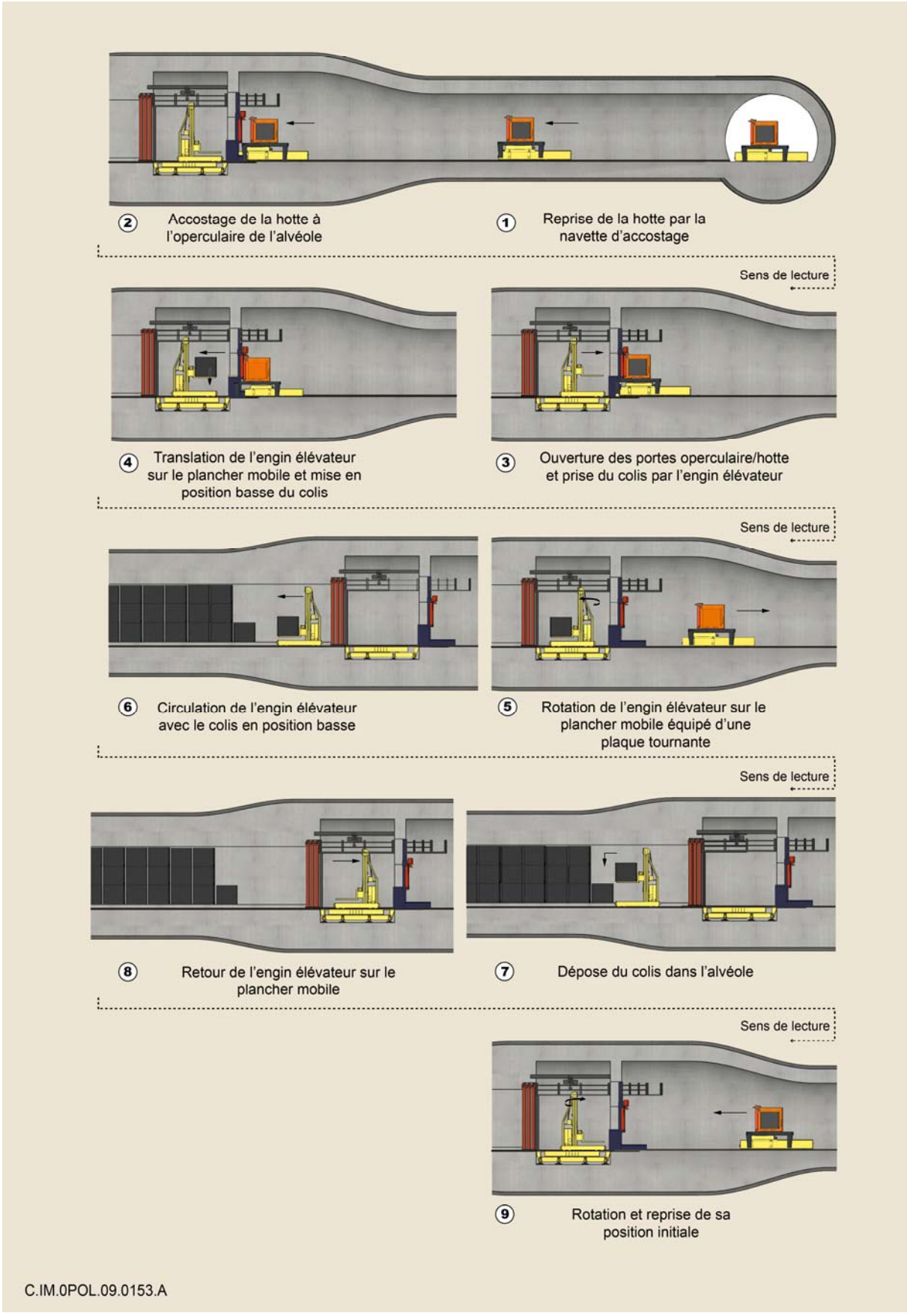


Figure 8-3 Synoptique du processus de mise en place des colis

Description du processus avec pont gerbeur

Le « pont gerbeur » est un équipement de type pont roulant, dont les sommiers circulent sur des rails implantés en corniche au niveau de la dernière couche de colis de stockage (cf. Figure 8-4). Les sommiers sont reliés par une poutre sur laquelle coulisse le fût équipé de fourches de préhension.

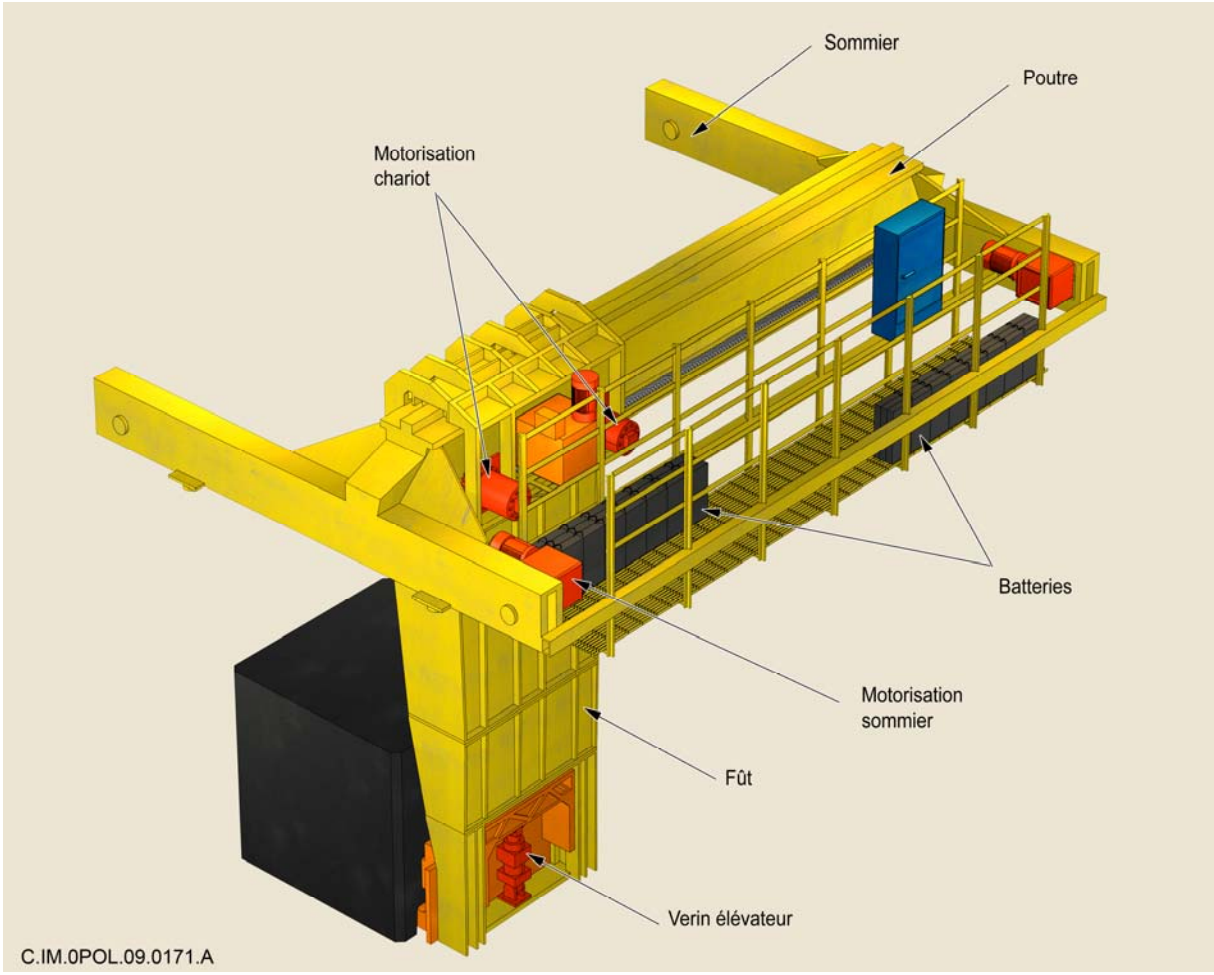


Figure 8-4 Vue du pont gerbeur

L'ensemble des équipements comprend :

- un chariot de transfert pour recevoir le colis après son extraction de la hotte et pour le déplacer jusqu'à l'équipement élévateur (« unité de mise à niveau »),
- un équipement élévateur qui a pour fonction de mettre le colis en situation pour être repris par le pont gerbeur à la bonne hauteur (celle de la couche en cours d'exploitation),
- un pont gerbeur, de portée adaptée à la largeur de l'alvéole dont les sommiers se déplacent avec un guidage par galets sur deux rails, à hauteur de la dernière couche de colis. L'alimentation électrique du pont-gerbeur est assurée par des batteries implantées sur une passerelle située à l'arrière de la poutre.
- La hauteur des fourches est mise en configuration pour l'exploitation d'une couche donnée. Cette opération est faite dans la cellule de manutention au début de l'exploitation de chaque couche.
- Le contrôle commande du pont pourrait se faire en utilisant la technologie de la transmission sans fil par radio fréquence à l'instar de ce qui est présenté pour les autres concepts ou, éventuellement, par des câbles rayonnants reposant sur les corniches des chemins de roulement.
- la porte d'accostage et une porte séparative séparant la cellule de manutention de la cellule de stockage, deux passages (un dédié aux sommiers et poutre du pont, l'autre pour le passage du fût et du colis).

Le cycle se décompose en plusieurs étapes (cf. Figure 8-5) :

1. La hotte est accostée par la navette sur la porte guichet de la cellule de manutention. Après ouverture des portes, le dispositif de poussée de la hotte introduit le colis dans l'alvéole et l'amène sur le chariot de transfert. L'ensemble (chariot/colis) se déplace jusqu'à l'unité de mise à niveau.
2. L'unité de mise à niveau positionne le colis au niveau requis, correspondant à celui de la couche de colis en cours d'exploitation.
3. Le pont gerbeur vient se placer en face du colis (positionné à la bonne hauteur) et prend le colis par le dessous à l'aide de ses fourches,
4. Les portes de protection radiologique séparant la cellule de manutention de la partie de l'alvéole dédiée au stockage s'ouvrent pour permettre l'entrée du pont gerbeur en charge de son colis,
5. Le pont avance dans l'axe de la porte, à hauteur constante, jusqu'au front de colis stockés. Le colis est déplacé latéralement et déposé à son emplacement final.
6. Le pont gerbeur revient à vide dans l'axe de la porte jusqu'à la cellule de manutention.

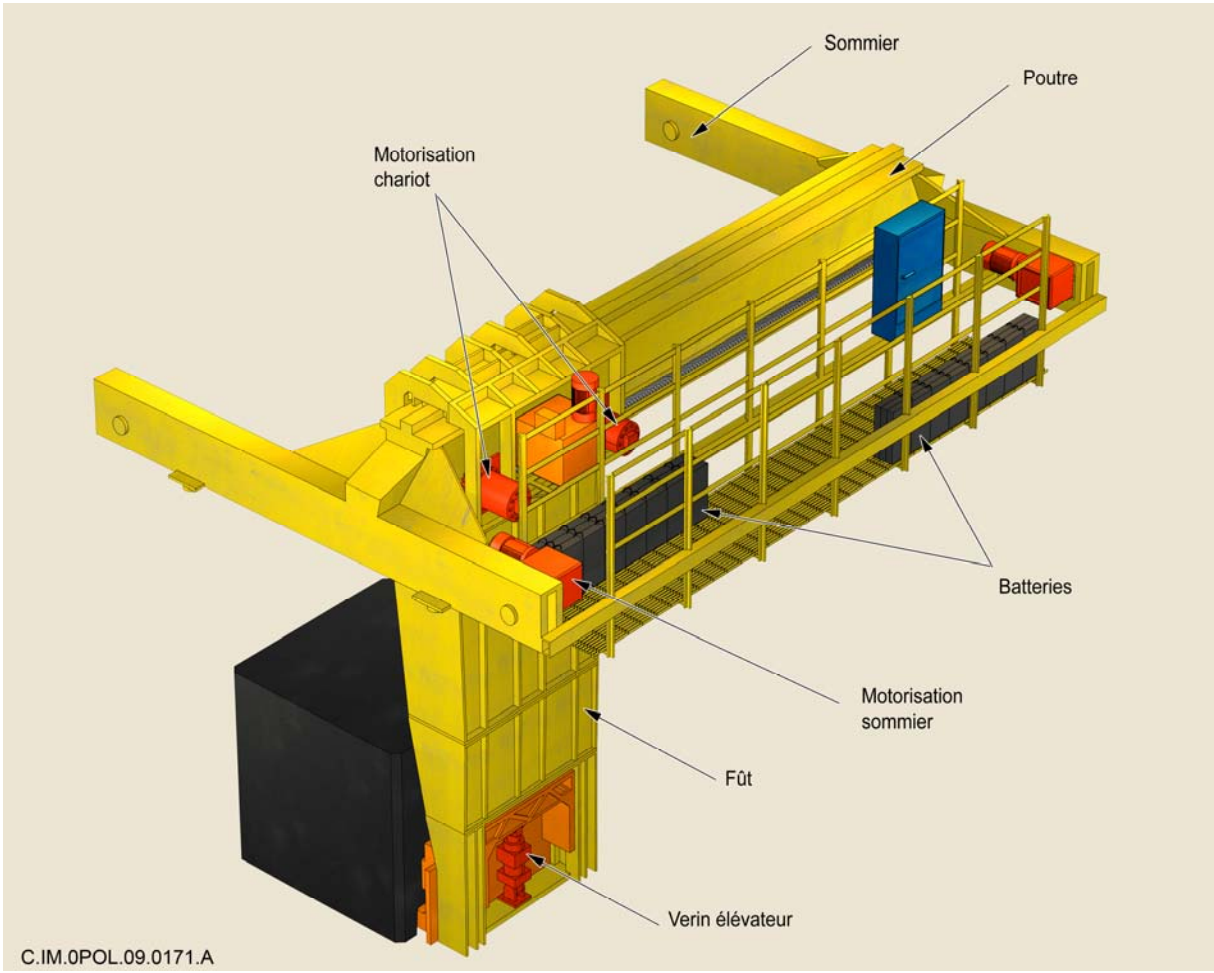


Figure 8-5 *Vue de la cellule de manutention et du positionnement des différents équipements*

8.3.3 Analyse des différentes solutions présentées

Le tableau suivant rappelle les principales caractéristiques des différentes solutions et donne des indications sur leur domaine d'application.

Tableau 8-1 Principales caractéristiques des processus de mise en stockage des colis MAVL

Processus	Equipements principaux de la cellule de manutention	Equipement de transfert et de manutention dans la cellule de stockage	Masse de la charge maximum (tonnes) Type de colis	Estimation du pourcentage d'alvéoles de stockage concernées
Mise en place de piles de colis après pré-empilage en cellule de manutention	Table de réception, pont roulant et transbordeur	Chariot porteur sur rails	< 60t (pour une pile de 2 ou 3 colis) Colis de dimensions liées à la conception de l'engin porteur[16]	66%
Mise en place individuelle avec gerbage des colis en fond d'alvéole	Transbordeur avec table tournante	Chariot élévateur à fourches (stockeur) sur rails	< 15t Colis de petites dimensions	34% (dont 23% pour des colis < 10t et 11% pour des colis > 10t)
Mise en place individuelle des colis par couches successives	Chariot de réception du colis et unité de mise à niveau du colis	Pont gerbeur sur rails en corniches	< 10t Colis de petites dimensions	

Compte tenu de la diversité des colis de stockage, il apparaît utile de poursuivre l'étude des deux solutions qui ne couvrent pas la même gamme de colis de stockage en termes de dimensions et de masse.

8.3.4 Retrait des colis de l'alvéole

Les moyens de manutention de colis de déchets MAVL sont conçus pour donner la possibilité d'inverser la séquence de mise en place pour permettre le retrait des colis de stockage.

La probabilité de contamination d'un colis de stockage MAVL est extrêmement faible compte tenu des différents contrôles réalisés sur le colis avant sa mise en stockage[17]. Dans le cas hypothétique d'une contamination labile sur le colis lors d'une opération de retrait des colis, les aspects à traiter concernent d'abord le contrôle de non contamination, qui pourrait s'effectuer dans la cellule de manutention, les modalités de mise en place d'un zonage pour éviter la dissémination, puis la gestion d'un colis contaminé dans l'installation.

[16] Un chariot porteur circulant dans un chemin de roulement central tel que présenté précédemment (cf. §8.3.1) pose la pile de colis sur les bordures du chemin de roulement. Cela nécessite d'avoir des colis faisant au moins de l'ordre de 2,3 m au niveau de leur base. En revanche, un autre type de chariot porteur avec deux sommiers reliés par une poutre et circulant dans deux chemins de roulement parallèles poserait la pile de colis entre les deux chemins de roulement, et serait de ce fait adapté à des colis de plus petites dimensions. L'Andra a prévu de poursuivre les études relatives au préempilage également dans cette voie.

[17] Le colis primaire fait l'objet d'un premier contrôle de conformité chez le producteur avant son expédition vers les installations de surface du centre de stockage. Un deuxième contrôle est réalisé lors de sa réception dans les installations de surface du centre de stockage. Le colis de stockage fait également l'objet d'un contrôle de non-contamination avant son transfert vers l'alvéole de stockage souterraine. Les conditions d'environnement du stockage susceptibles d'influer sur l'évolution des colis sont suivies.

8.4 Essais technologiques

Un premier démonstrateur technologique MAVL est en cours de développement pour la mise en place avec préempilage. Dans ce cadre, des essais de contrôle-commande par radiofréquence en souterrain ont déjà été réalisés au LSBB à Rustrel (cf. § 7.4).

Ce démonstrateur permettra d'évaluer les limites éventuelles des moyens étudiés vis-à-vis d'une récupération, en simulant des situations dégradées : capacité de récupération de colis à partir d'une pile comportant des défauts d'empilement, déformations différées de l'alvéole (affectant en particulier le chemin de roulement du chariot de manutention).

D'autres prototypes sont également envisagés dans le futur sur le mode de manutention avec mise en place individuelle des colis.

9

Conteneur de stockage HA

9.1	*Objectifs fonctionnels*	*78*
9.2	*Options de conception*	*78*
9.3	*Les solutions présentées*	*79*
9.4	*Essais technologiques*	*80*

Les conteneurs de stockage doivent accueillir des colis de déchets ou de combustibles usés fortement irradiants, qui sont par ailleurs moyennement exothermiques (C0 et CU3) à fortement exothermiques (autres colis HA).

9.1 Objectifs fonctionnels

Le conteneur de stockage (ou surconteneur) a pour fonction de protéger les déchets vitrifiés HA ou les combustibles usés d'une arrivée d'eau pendant la phase dite « thermique » du colis, jusqu'à ce que la température du verre soit inférieure à 50 °C. La durée de cette phase dépend du colis type. Elle peut atteindre le millier d'années (pour le colis type C6 du modèle d'inventaire).

Cette fonction conduit à attribuer une exigence d'étanchéité au conteneur de stockage, en tenant compte de l'irradiation gamma et de la radiolyse qu'elle induit, des processus de corrosion et du chargement mécanique au cours du temps.

Le conteneur de stockage doit favoriser la dissipation de la chaleur dégagée par les colis de manière homogène.

Par ailleurs, il doit permettre la mise en alvéole des colis et préserver la possibilité de retrait sur une durée a minima séculaire.

9.2 Options de conception

9.2.1 Forme et dimensions du conteneur de stockage

La forme extérieure du conteneur de stockage est cylindrique. Son aménagement intérieur est pour recevoir des colis primaires de déchets, ou des étuis de combustibles usés, qui sont à ce jour de forme cylindrique. Le conteneur de stockage est d'un diamètre légèrement supérieur à celui du colis primaire. Il est conçu pour limiter le taux de vide dans l'alvéole de stockage : les espaces vides intérieurs entre le conteneur et les colis primaires sont minimisés et son interface de manutention permet de réduire le jeu de manutention à l'extrados du conteneur dans l'alvéole.

Dans le cas général, le conteneur de stockage est dimensionné pour accueillir un seul colis primaire. Pour certains colis primaires de longueur réduite, la possibilité d'introduire deux colis est également à envisager.

9.2.2 Matériau constitutif du conteneur de stockage

La conception du conteneur de stockage doit mettre en œuvre des matériaux dont l'évolution, sur une période correspondant à la phase thermique, est prédictible. Le choix de l'acier non allié a été retenu pour sa simplicité et sa robustesse.

L'épaisseur d'acier devra permettre :

- de limiter le débit de dose à l'extrados du colis pour rendre la corrosion radiolytique faible ou du même ordre que la corrosion en conditions réductrices,
- de résister à la pression d'eau appliquée au cours du temps sur le colis, qui pourra atteindre la pression hydrostatique à la profondeur du stockage.

Le procédé de fabrication retenu devra s'appuyer sur des procédures d'approvisionnement, de dimensionnement et de construction codifiés, normalisés et contrôlables.

Parallèlement à cette option de référence, l'Andra poursuit des études exploratoires sur des matériaux alternatifs limitant les quantités de fer tels qu'une céramique industrielle.

9.2.3 Transfert depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage

Le conteneur de stockage n'est pas dimensionné pour assurer la protection biologique vis-à-vis de l'exposition externe aux rayonnements. Son transfert à l'intérieur des installations est fait dans une

hotte assurant la protection radiologique, depuis les installations de surface jusqu'à l'accostage de la hotte de transfert sur l'alvéole de stockage.

9.2.4 Manutention et mise en place en alvéole

Le conteneur doit disposer d'interfaces de manutention dont la pérennité sur la période de réversibilité peut être garantie.

Cela concerne des patins incorporés au conteneur pour éviter un contact direct avec le chemisage de l'alvéole. Ces patins ne doivent pas constituer des points chauds sur le chemisage de manière à limiter des échauffements localisés de la roche hôte pendant la phase thermique.

Cela concerne aussi l'interface de préhension compatible avec une manutention verticale ou horizontale et permettant un retrait du conteneur dans des conditions pénalisantes vis-à-vis de l'état du chemisage.

9.3 Les solutions présentées

Le conteneur de stockage est constitué d'une virole en acier non allié de 55 mm d'épaisseur. La masse du colis de stockage (colis primaire et surconteneur) est de l'ordre de 2 tonnes. Sa manutention est assurée par une gorge de préhension usinée directement dans le couvercle de fermeture du surconteneur. L'Andra examinera les possibilités d'utiliser de l'acier recyclé provenant du démantèlement d'installations nucléaires.

La résistance de l'enveloppe et de la gorge de manutention du surconteneur ont été respectivement vérifiées en analysant les contraintes calculées pour différentes sollicitations, suivant les prescriptions du Code de Construction des Appareils à Pression (CODAP) et les règles préconisées par la Fédération Européenne de la Manutention (FEM). L'utilisation de ce code et de ces règles qualifiés améliore le niveau de confiance du dimensionnement. L'épaisseur de 55 mm, liée à la maîtrise de la radiolyse, offre une résistance mécanique supérieure à celle requise pour la manutention.

Le conteneur de stockage est doté de patins en céramique inerte évitant un contact direct acier/acier entre le surconteneur et le chemisage des alvéoles de stockage. Cette disposition facilite les opérations de mise en place mais aussi d'un retrait éventuel, en améliorant le glissement du conteneur lors de sa manutention horizontale dans l'alvéole de stockage. Parmi les céramiques étudiées, la zircone présente l'avantage d'une faible conductivité thermique qui favorise la densité du stockage en évitant la formation de points chauds sur le chemisage.

Les procédés de réalisation du surconteneur ont été choisis pour limiter les facteurs de corrosion localisée induits par le processus de fabrication. La composition de l'acier est affinée lors de la fusion finale afin de favoriser la propreté inclusionnaire du métal. Le taux de carbone a été abaissé pour favoriser les opérations de soudage. Le forgeage ou le perçage étirage du corps améliorent la compacité du métal (corroyage), ce qui a pour effet de supprimer ou de réduire la taille des défauts volumiques présents dans les lingots issus de la fusion. La qualité métallurgique des composants du surconteneur est ensuite vérifiée durant toutes les étapes de la fabrication (analyse chimique, essais mécaniques sur éprouvettes, contrôle ultrasons…) suivant des procédures qualifiées et normalisées en fonction du processus de fabrication retenu.

La fermeture du conteneur de stockage s'effectue en cellule blindée (mise en surconteneur du colis primaire, pose et soudage du couvercle). Pour cette opération, la technique de soudage par faisceau d'électrons permet d'obtenir une soudure de pleine épaisseur et des qualités métallurgiques satisfaisantes au niveau du contact entre le corps et le couvercle.

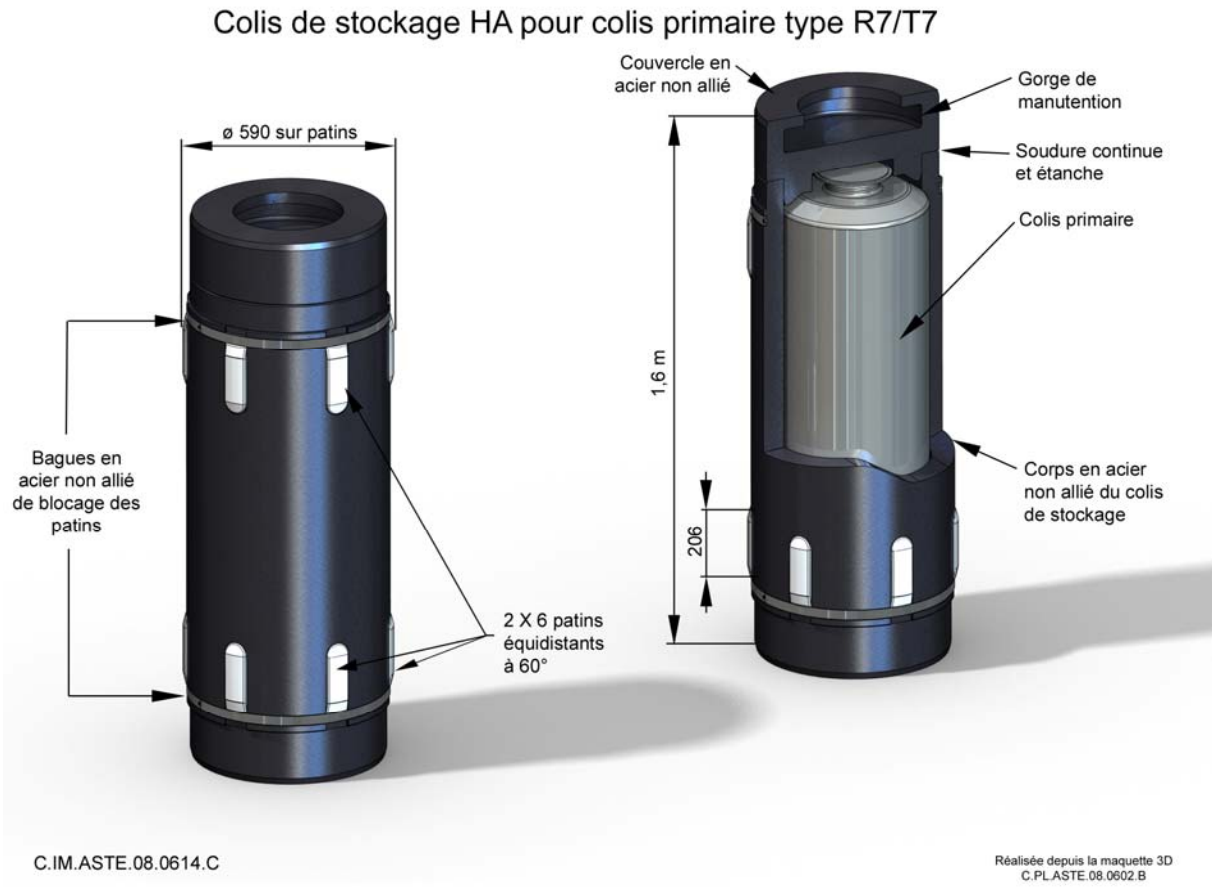


Figure 9-1 Colis de stockage HA

9.4 Essais technologiques

Des essais de fabrication des surconteneurs en acier à l'échelle 1 ont été lancés en septembre 2009 en utilisant la méthode de « perçage étirage». Cette méthode permet de s'affranchir d'une opération de soudage du fond sur la virole centrale du surconteneur.

Les premiers résultats de cette campagne d'essais, qui porte sur la fabrication du corps du surconteneur et sur des essais de soudage par faisceau d'électrons, devraient être disponibles à partir de mi 2010.

Figure 9-2 Corps de surconteneur percé-étirés à l'état brut

Par ailleurs, les patins assurant le glissement des conteneurs de stockage sur le chemisage métallique de l'alvéole de stockage ont fait l'objet de développements au niveau de leur forme et de leur nature (alumine, zircone). La validation des coefficients de glissement céramique / acier a permis de conforter le dimensionnement des équipements de mise en place et de retrait éventuel des colis.

Figure 9-3 Banc d'essais des patins (vue d'ensemble et vue de patins testés)

10

Alvéole de stockage HA

10.1 Objectifs fonctionnels 84
10.2 Options de conception 84
10.3 Les solutions présentées 85
10.4 Essais technologiques 87

10.1 Objectifs fonctionnels

Du point de vue de la sûreté à long terme, les alvéoles de stockage HA contribuent aux fonctions suivantes :

- S'opposer aux circulations d'eau, pour favoriser un transport à diffusion dominante dans les alvéoles et à leur voisinage,
- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser en limitant le chargement mécanique des conteneurs de stockage, en évitant l'apport d'oxygène susceptible de corroder le conteneur de stockage, et en apportant un environnement physico-chimique réduisant la dissolution des déchets vitrifiés,
- Retarder et atténuer la migration des radionucléides, en préservant une épaisseur d'argilite au dessus et en dessous de l'alvéole qui constitue une barrière de diffusion,
- Protéger la roche hôte en limitant l'échauffement induit par les déchets et les perturbations mécaniques associées à la présence de vides dans l'alvéole.

Du point de vue de la sûreté en phase d'exploitation et de la réversibilité, la stabilité de l'ouvrage doit être assurée sur une période a minima séculaire. Les personnes doivent pouvoir être protégés contre l'irradiation.

La récupérabilité des colis de stockage repose sur le maintien de l'intégrité des conteneurs de stockage et des composants de l'alvéole ainsi que sur la préservation d'un jeu fonctionnel autour des conteneurs permettant leur retrait *a minima* sur une durée séculaire.

10.2 Options de conception

Les alvéoles de stockage HA sont des microtunnels borgnes situés dans un plan en partie médiane de la couche d'argilites. Ce plan suit globalement le pendage de la couche et préserve une garde d'argilites d'une soixantaine de mètres avec le mur et le toit de la couche.

Le diamètre de l'alvéole est minimisé : il correspond à celui des colis de stockage, augmenté du jeu de manutention et de l'épaisseur du chemisage.

Le chemisage est dimensionné pour assurer la tenue mécanique pendant la durée de la phase thermique. L'acier non allié à bas carbone est retenu à ce stade des études. Le chemisage facilite les opérations de retrait éventuel des colis en préservant les jeux de manutention. Pour limiter la corrosion dans l'alvéole, des procédés industriels d'assemblage des tronçons du chemisage sont étudiés pour le rendre étanche à l'eau. Le retour d'expérience de tubages employés par l'industrie pétrolière permet d'envisager des durées d'étanchéité de plusieurs dizaines d'années au moins. Le fond du chemisage est fermé par une plaque d'étanchéité.

La chaleur dégagée par les colis est dissipée par conduction dans les argilites. Les distances entre alvéoles adjacentes sont déterminées pour que la température au contact des colis de stockage reste inférieure à 100 °C et que celle dans la roche hôte ne dépasse pas 90°C. Pour les déchets fortement exothermiques, une phase préalable d'entreposage est en outre nécessaire. Les colis doivent être entreposés au moins 60 à 70 ans et, dans ce cas, séparés dans les alvéoles par des intercalaires de même section que les colis, et remplis d'un matériau inerte au plan chimique. Une augmentation de la durée d'entreposage permet de diminuer l'espacement entre colis.

A l'interface avec la galerie d'accès, la tête d'alvéole est conçue pour protéger les opérateurs du rayonnement émis par les colis présents dans les alvéoles et lors des opérations de mise en place et de retrait éventuel. Des dispositions sont étudiées pour limiter le renouvellement d'air dans l'alvéole. La conception de la tête d'alvéole permet une libre dilatation thermique du chemisage. Des moyens de prélèvement de l'atmosphère interne de l'alvéole sont étudiés pour observer son évolution dans le temps. Lors de l'obturation de l'alvéole, la tête d'alvéole est comblée par un bouchon d'argile appuyé sur un bouchon de béton pour limiter les circulations d'eau et les déformations mécaniques à long terme.

10.3 Les solutions présentées

10.3.1 Description de l'alvéole

L'alvéole de déchets HA (cf. Figure 10-1) est un microtunnel d'environ 40 mètres de longueur et de 0,7 m de diamètre. Elle comprend une partie utile sur environ 30 m de longueur, dans laquelle sont stockés les colis, et une tête d'alvéole d'environ 10 mètres. Elles sont orientées favorablement par rapport au champ de contraintes mécaniques naturelles.

La partie utile de l'alvéole (« cellule de stockage »), qui accueille les colis, est dotée d'un chemisage en acier non allié. Le fond d'alvéole est fermé par une « plaque de fond », également en acier non allié.

La tête d'alvéole est séparée de la partie utile par un bouchon métallique de radioprotection. Elle est dotée d'un chemisage métallique[18] (« insert ») dans lequel est placé un ensemble composé d'un bouchon d'argile gonflante appuyé sur un bouchon en béton qui obture l'alvéole, qui contribue à la sûreté. Cette configuration correspond à la période après exploitation et obturation de l'alvéole.

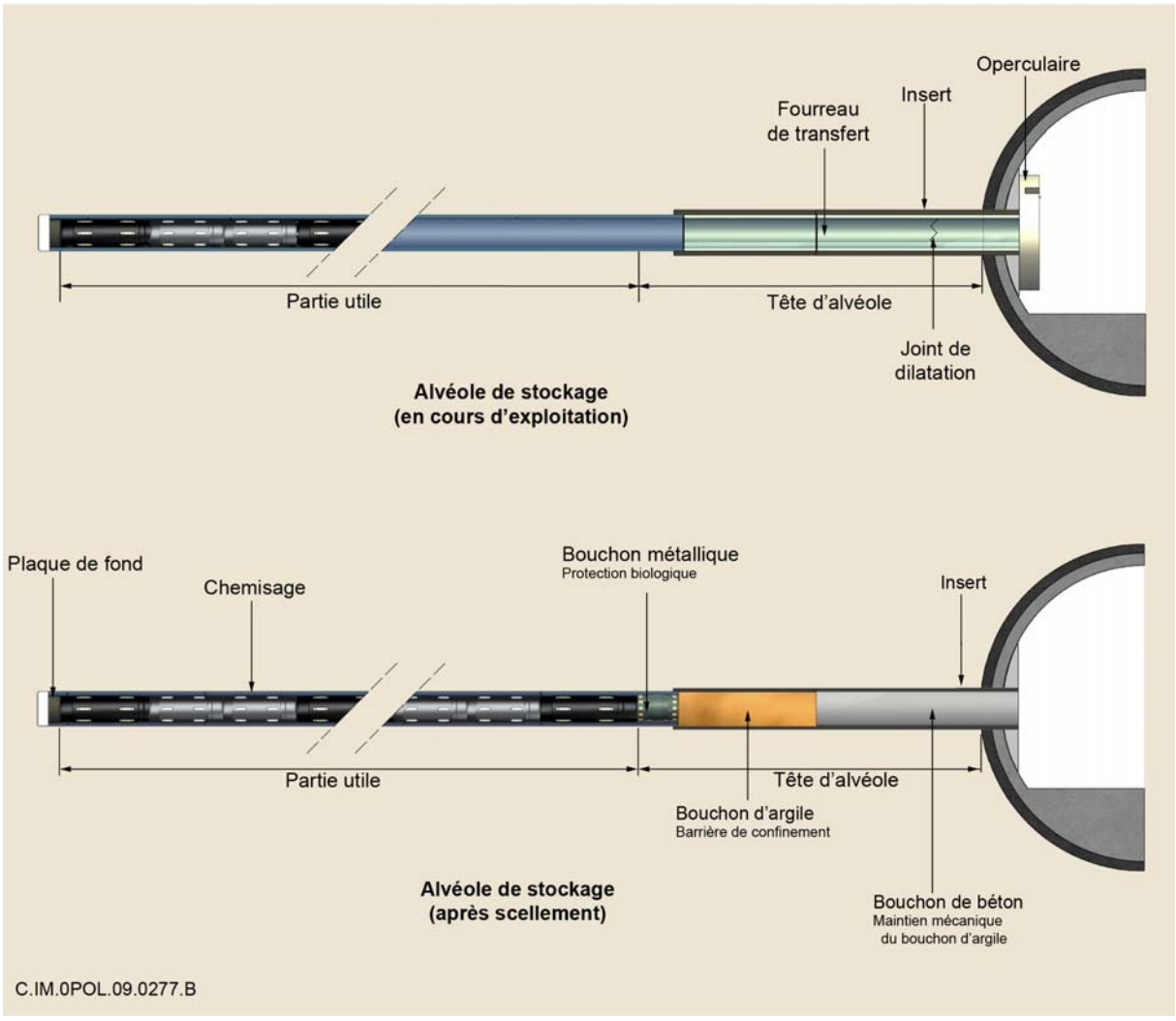


Figure 10-1 Alvéole de stockage de colis HA exothermiques

[18] Le diamètre du chemisage de la partie utile est inférieur à celui de l'insert de la tête d'alvéole. Cela lui permet de coulisser dans l'insert. Les effets de poussée liés à son allongement, conséquence de l'échauffement dû aux colis exothermiques, sont ainsi absorbés sans répercussion sur l'ensemble de la tête d'alvéole.

La partie utile de l'alvéole peut accueillir environ 20 colis moyennement exothermiques (colis C0) ou de 6 à 8 colis fortement exothermiques. Les colis fortement exothermiques sont espacés par des intercalaires pour homogénéiser le flux thermique.

L'épaisseur du chemisage, de l'ordre de 35 mm à 560 m de profondeur, est déterminée pour empêcher la mise en charge des colis de stockage par le terrain pendant la phase thermique. Elle permet également de garantir le maintien des jeux opérationnels nécessaires au retrait des colis stockés pendant la période de réversibilité. L'insert de tête d'alvéole est également dimensionné pour permettre l'exploitation réversible de l'alvéole.

10.3.2 Construction de l'alvéole

L'alvéole de stockage est réalisée en deux phases de forage, de diamètres différents, avec mise en place simultanée d'un tubage. La première phase correspond à la mise en place de l'insert de tête d'alvéole ; la seconde correspond à la poursuite du forage au-delà de l'insert, avec la mise en place du chemisage de l'alvéole à l'avancement.

En cours de forage, les déblais de creusement sont évacués vers la galerie d'accès au moyen d'une vis sans fin assemblée à mesure que de nouveaux tronçons de chemisage sont connectés au train de tubes poussé dans l'alvéole. En fin de chaque phase de forage, les molettes externes de l'outil de coupe situé en avant du tubage pivotent de manière à laisser passer celui-ci dans l'insert de tête d'alvéole ou dans le chemisage laissés en place.

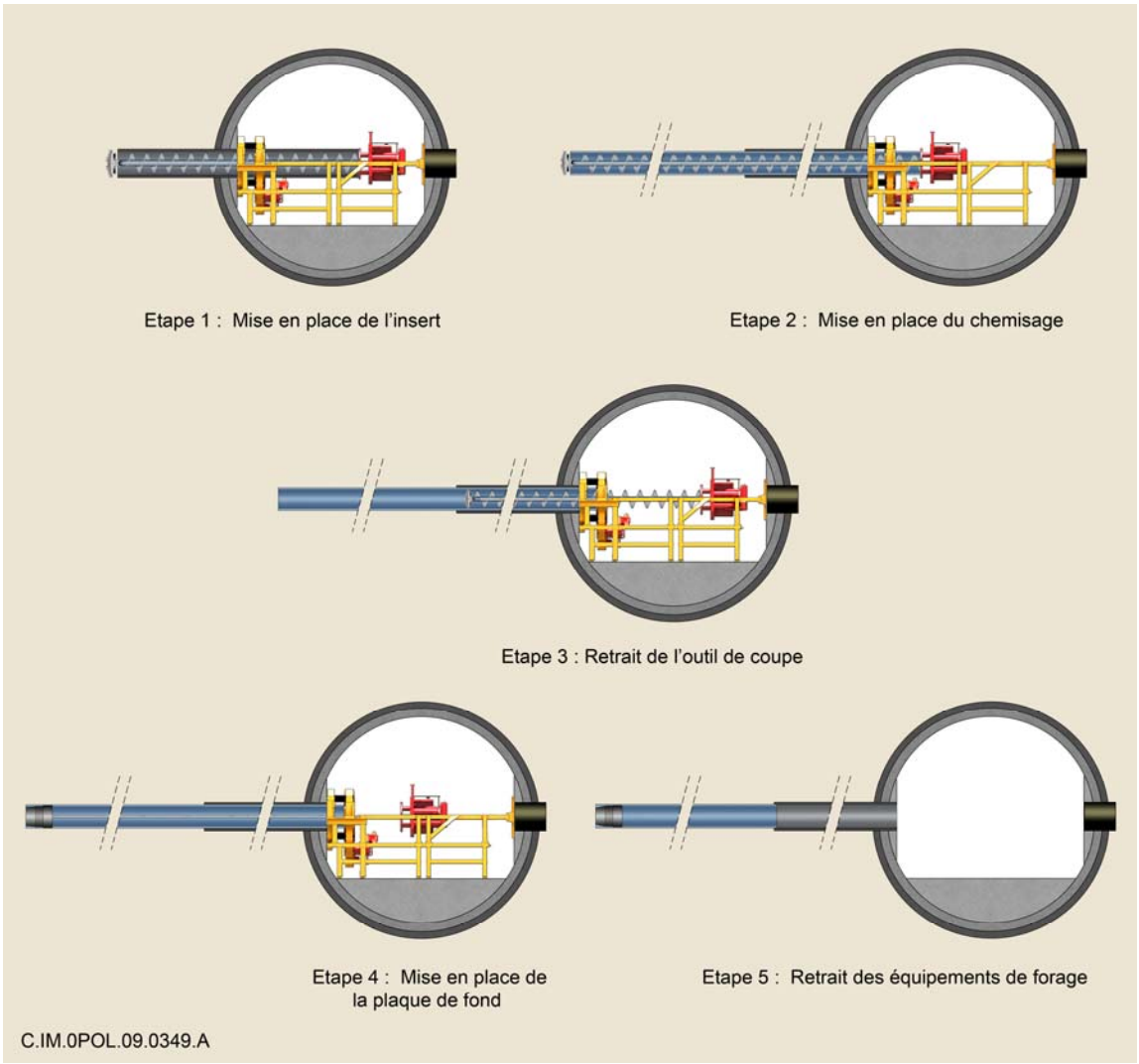


Figure 10-2 Construction de l'alvéole

L'insert et le chemisage sont constitués de tronçons de 1 à 3 mètres de longueur connectés par vissage. Ces connexions intègrent des surfaces tronconiques qui confèrent une étanchéité à l'assemblage en fin de vissage.

Après extraction de l'outil de coupe et nettoyage de la surface interne du chemisage, la plaque de fond est mise en position et assemblée par vissage à l'extrémité du chemisage. L'atelier de forage est alors déplacé jusqu'à l'implantation d'alvéole suivante.

10.3.3 Exploitation de l'alvéole

Au moment de la mise en exploitation de l'alvéole de stockage, les surfaces internes du chemisage et de l'insert de tête d'alvéole sont de nouveau nettoyées. Un fourreau, doté d'un joint de dilatation thermique, est mis en place dans l'insert pour établir une continuité de la piste de glissement des colis de stockage avec le chemisage de la partie utile de l'alvéole.

En galerie, un dispositif d'ouverture et de fermeture de l'alvéole est assemblé sur l'insert. Ce dispositif, nommé operculaire, intègre des écrans de radioprotection, et permet l'isolement radiologique des colis mis en alvéole pendant la durée d'exploitation de celle-ci.

En fin de remplissage de l'alvéole, avec l'ensemble des colis en position dans la partie utile de l'alvéole, un bouchon métallique de fermeture est mis en place dans le chemisage à une dizaine de mètres de la galerie. Ce bouchon, qui comprend un écran de protection radiologique, permettra le retrait de l'operculaire (et sa réutilisation pour l'exploitation d'une autre alvéole) et du fourreau d'exploitation. Le bouchon peut être muni de points de connexion pour installer des lignes de prélèvement et de contrôle de l'atmosphère occluse dans la cellule de stockage. Ces lignes sont connectées à une console de mesures installée sur la plaque de fermeture de l'alvéole.

10.3.4 Obturation de l'alvéole

L'obturation de l'alvéole débute par le démontage des connexions du bouchon métallique de fermeture et le bouchage des lignes de prélèvement. Un bouchon d'argile gonflante d'environ 3 m de longueur est alors mis en place dans l'insert de tête d'alvéole, sous forme d'argile pulvérulente compactée au fur et à mesure de sa construction. La fermeture s'achève par la réalisation d'un massif d'appui en béton.

10.4 Essais technologiques

Un programme d'essais a été initié au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne pour préciser la méthode de réalisation des alvéoles. Ce programme étudie notamment les points suivants :

- Influence de l'orientation de l'alvéole sur l'endommagement de la roche,
- Qualification de la qualité de la découpe des alvéoles HA,
- Quantification de l'espace annulaire minimal nécessaire au creusement d'une alvéole HA,
- Quantification de l'effort de poussée pour l'introduction du chemisage,
- Maîtrise de la trajectoire de foration,
- Structure de la tête d'alvéole et lien avec le génie civil de la galerie.

Les premiers essais de creusement d'alvéoles de stockage avec un équipement de type forage avec tête dirigeable et évacuation des déblais à la tarière (cf. Figure 10-3) ont contribué à mettre au point l'équipement et à acquérir une meilleure connaissance de la réaction du terrain. L'étape suivante de développement jusqu'en 2015 vise à tester la réalisation et le comportement d'une alvéole chemisée sur 40 mètres[19].

Au-delà des aspects strictement technologiques, ces essais donneront également lieu à des mesures de comportement hydromécanique et d'endommagement. Ces mesures seront poursuivies après 2015.

[19] On pourra également réaliser des essais de creusement d'alvéoles sur des longueurs au-delà de 40 mètres pour appréhender les limites technologiques des procédés utilisés. Les résultats devraient être disponibles dans la période 2015-2025 et pourront se poursuivre ultérieurement dans le cadre des études d'optimisation.

Après des essais préalables en surface pour la mise au point de la technique d'assemblage des éléments de chemisage (soudure, vissage…), la technique retenue sera testée dans des conditions réelles en souterrain. Ces essais *in situ* visent à qualifier la technique d'assemblage, en particulier en matière de défauts géométriques d'alignement et d'étanchéité au niveau des jonctions entre tubes. Ces essais seront initiés avant 2015.

Les expérimentations en Laboratoire souterrain relatives à la fermeture de l'alvéole concernent en priorité trois volets technologiques : (i) la mise en place du bouchon métallique de radioprotection, (ii) la mise en place du bouchon d'argile gonflante, et (iii) la réalisation d'un massif d'appui en béton. Après ces essais, on procèdera *in situ* à des tests de performance du bouchon en vraie grandeur. Pour cela il est nécessaire que l'argile gonflante soit resaturée. L'expérimentation devra comprendre un dispositif de resaturation artificielle pour accélérer la resaturation. Une fois la saturation atteinte, l'étanchéité du bouchon sera vérifiée par des tests de mise en pression d'abord à l'eau, puis au gaz. L'ensemble de ces tests prendra plusieurs années.

Il est également envisagé de reproduire en vraie grandeur la dissipation thermique autour d'une alvéole. Cet essai devrait durer une dizaine d'années pour que le volume de roche atteint par la perturbation thermique soit suffisamment représentatif des conditions du stockage.

Figure 10-3 *Alvéole en cours de creusement dans les argilites (Laboratoire de Meuse Haute-Marne - 2009)*

11

Manutention des colis HA dans les alvéoles de stockage

11.1 Objectifs fonctionnels 90
11.2 Options de conception 90
11.3 Les solutions présentées 90
11.4 Essais technologiques 94

11.1 Objectifs fonctionnels

Les objectifs fonctionnels sont proches de ceux présentés précédemment pour la manutention des colis de déchets MAVL :

- Les équipements de manutention des colis de stockage doivent assurer leur mise en place dans les alvéoles et leur retrait, le cas échéant, en assurant un flux industriel correspondant aux futures chroniques de mise en stockage.
- Ces transferts s'effectuent en protégeant les personnes contre l'irradiation. L'exposition du personnel sera optimisée, dans le respect d'une dose annuelle maximale de 5 mSv/an.
- Les vides résiduels autour des colis de stockage dans les alvéoles doivent être minimisés. Cela contribue à protéger la roche hôte de déformations mécaniques à long terme. Cet objectif doit néanmoins rester compatible avec la possibilité de retirer les colis de l'alvéole.
- Les équipements doivent pouvoir manutentionner les colis de stockage présentés (cf. chapitre 8) sans altérer l'intégrité des colis et des alvéoles.

11.2 Options de conception

Après transbordement d'une hotte de transfert sur une navette d'accostage, la hotte est acheminée jusqu'à l'alvéole pour y être déposée sur sa structure porteuse. L'enceinte de radioprotection de la hotte est translatée pour s'accoster à la porte de l'alvéole de stockage (cf. § 10.3.1.).

La conception des équipements de mise en alvéole des colis de stockage repose sur les options suivantes :

- les incidents redoutés dans le cadre de l'analyse de la sûreté ne peuvent pas être la conséquence d'une seule défaillance,
- la protection radiologique du personnel, lors des opérations d'exploitation, est obtenue par la présence d'un operculaire (porte rotative) en tête d'alvéole,
- les équipements utilisés pour la mise en place des colis, qui évoluent dans l'alvéole, doivent pouvoir être libérés de leur charge et ramenés dans la hotte de transfert,
- les colis sont transférés dans l'alvéole par glissement sur des patins,
- les équipements doivent être conçus pour évoluer en milieu fortement irradiant (choix des matériaux, écrans de protection) et dans une ambiance de température élevée,
- la tête de l'équipement de poussée est dotée d'un dispositif de préhension du colis permettant d'inverser le processus et de récupérer le colis,
- la tête d'alvéole, de longueur d'une dizaine de mètres, doit pouvoir être libérée en fin d'exploitation, en vue des opérations de fermeture de l'alvéole.

11.3 Les solutions présentées

La mise en place des colis en alvéole est étudiée au moyen de deux équipements indépendants qui sont successivement mis en œuvre dans le processus : un système utilisé pour le transfert et l'introduction des colis en tête d'alvéole et un système pour la mise en position définitive de stockage des colis à l'intérieur de l'alvéole. Utiliser deux équipements au lieu d'un seul présente l'avantage de limiter le temps d'immobilisation de la hotte de transfert à la seule opération d'introduction du colis dans la tête d'alvéole. Cela permet également la mise en œuvre d'une hotte de transfert plus compacte, mieux adaptée aux conditions de transport dans l'architecture souterraine du stockage et dans la descenderie (encombrement, masse…).

Ces moyens sont aussi capables de retirer les colis. La récupérabilité du colis est assurée par la possibilité d'agripper un colis par le second système depuis sa position de stockage dans l'alvéole et de le ramener en tête d'alvéole pour être ensuite réintroduit par le premier système dans une hotte de transfert et ramené dans les installations de surface.

A l'avenir, un troisième système dédié à la récupération de colis pourrait être étudié. Ce moyen serait capable de développer un effort de traction supérieur à celui utilisé pour la mise en place du colis, qui permettrait de vaincre un éventuel effet de collage à long terme du conteneur sur le chemisage (pour

mémoire, l'équipement du conteneur avec des patins en céramique industrielle évite néanmoins ce type d'effet).

Dans la suite, on présente les deux premiers systèmes.

11.3.1 Transfert et introduction des colis dans l'alvéole (ou extraction de l'alvéole)

L'équipement de transfert des colis dans l'alvéole met en œuvre une hotte équipée d'une chaîne pousseuse pour réaliser les opérations d'introduction d'un colis dans l'alvéole, ou sa reprise éventuelle.

Description de l'équipement

L'équipement comprend :

- l'enceinte blindée dimensionnée pour assurer la protection radiologique du personnel pendant les opérations de transfert des colis dans le stockage et lors de leur introduction (ou de leur extraction) dans les alvéoles de stockage,
- un système avec chaîne pousseuse, pour sortir le colis de l'enceinte blindée (ou sa réintroduction). La chaîne est dimensionnée pour le déplacement de plusieurs colis équipés de patins en céramique dans la tête d'alvéole. Elle est équipée d'une tête munie d'un grappin de préhension du colis. L'alimentation électrique est réalisée sur le réseau installé en galerie d'accès,
- la structure porteuse de l'enceinte et des équipements d'exploitation du système de poussée.

L'enceinte blindée est équipée d'un operculaire dont la fermeture assure la continuité de la protection radiologique de la hotte. Le mode d'accostage et la conception de l'operculaire permettent la continuité de la piste de glissement des colis entre l'enceinte blindée de la hotte et l'alvéole.

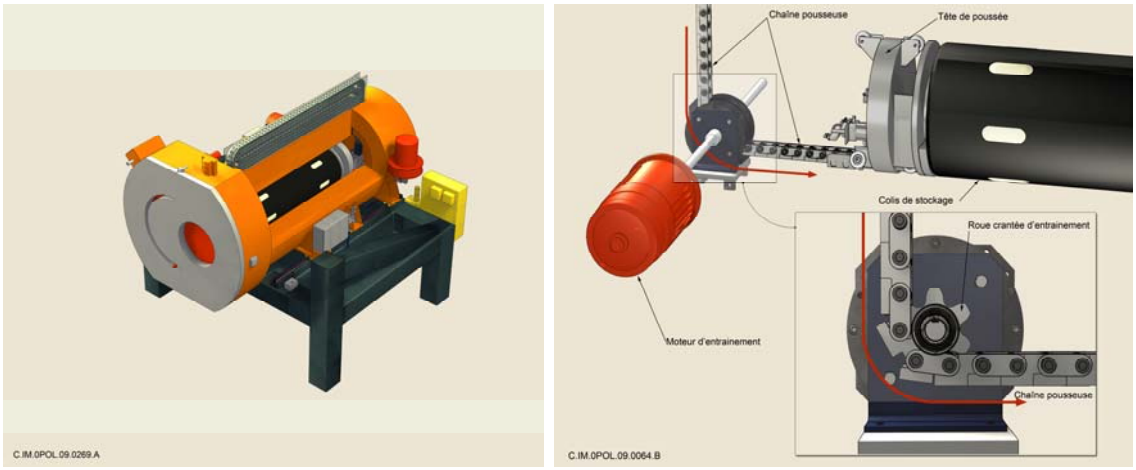


Figure 11-1 Hotte de transfert des colis HA et principes de fonctionnement d'une chaîne pousseuse

La mise en œuvre d'une chaîne pousseuse confère à la hotte de transfert la compacité recherchée pour circuler dans les galeries de transfert du stockage.

Description du processus d'introduction des colis dans l'alvéole

Le cycle d'introduction d'un colis se décompose en plusieurs étapes : l'accostage et l'ouverture simultanée des portes de la hotte et de l'alvéole, l'introduction du colis dans l'alvéole puis le retour de la tête de poussée dans la hotte, la fermeture des portes et le désaccostage de la hotte vide. Ce cycle peut être répété plusieurs fois (cf. Figure 11-2) avant de recourir au second équipement nécessaire pour le déplacement et la mise en stockage des colis (ou des intercalaires) dans la partie utile de l'alvéole.

Le retrait des colis s'effectue comme l'introduction, colis par colis, en inversant le processus,

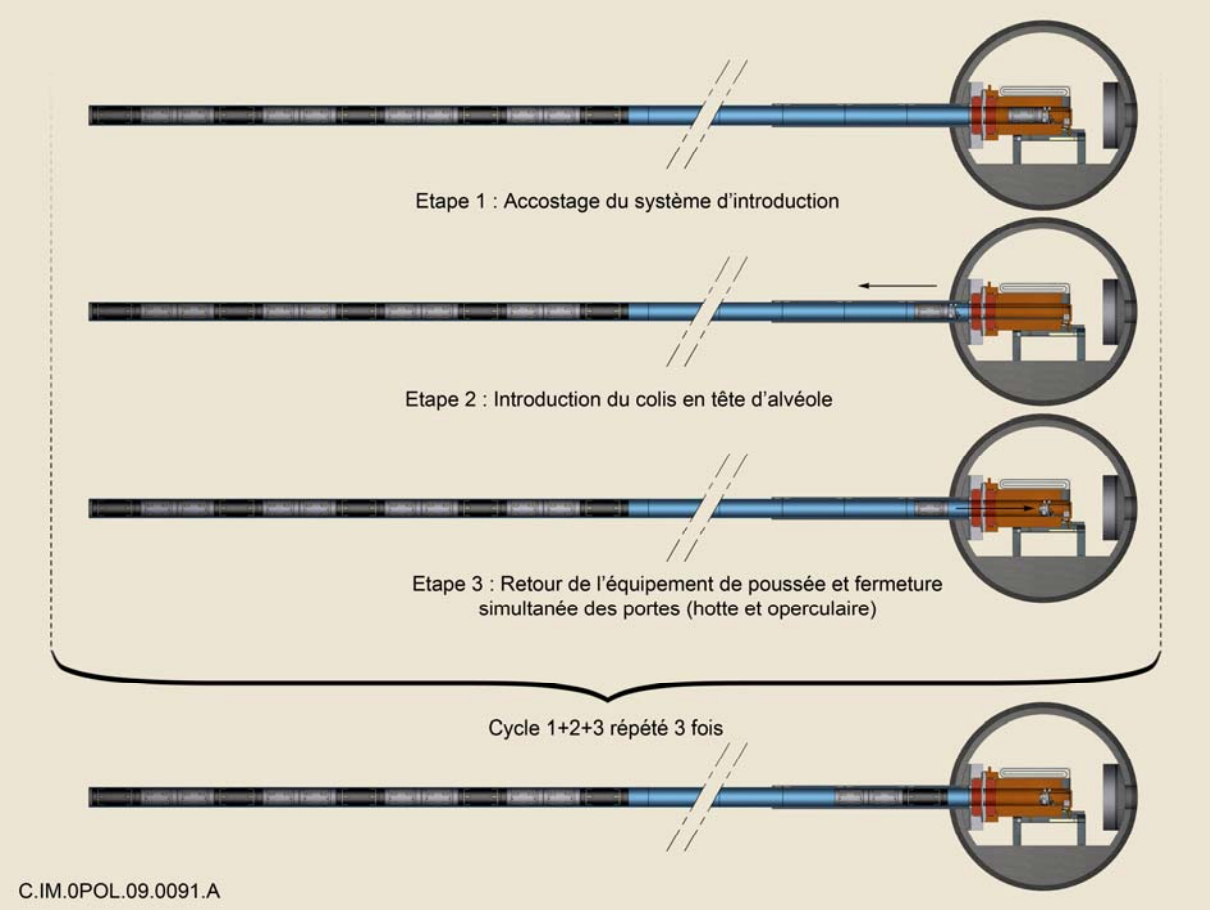


Figure 11-2 Cycle d'introduction de mise en place de colis dans l'alvéole de stockage (cas de colis séparés par deux intercalaires)

11.3.2 Translation des colis dans l'alvéole

Un second équipement est utilisé en complément du premier. Il s'agit d'un équipement contenant un robot poussant pas à pas les colis qui, après son accostage à l'alvéole, permet la translation d'un colis ou de plusieurs pour la mise en place dans l'alvéole.

Description de l'équipement

L'équipement comprend :

- une enceinte d'exploitation accueillant le robot pousseur,
- les utilités de traitement et d'alimentation en air comprimé du robot pousseur,
- l'ombilical d'alimentation et de pilotage du robot et son enrouleur,
- le système de connexion au réseau électrique installé en galerie,
- une station de contrôle et commande du robot,
- la structure porteuse de l'enceinte et des équipements d'exploitation du système de poussée.

Cet équipement est apporté et mis en position d'accostage par la même navette que celle utilisée pour le transfert de la hotte.

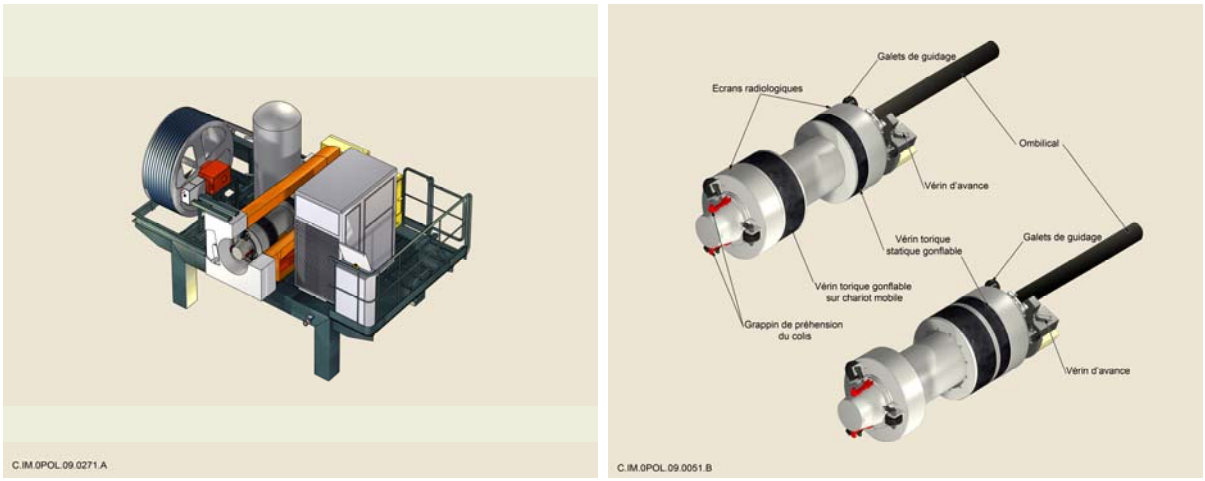


Figure 11-3 Hotte d'exploitation avec un robot pousseur

Description du processus de mise en position de stockage des colis dans l'alvéole

Le cycle de mise en position de stockage se décompose en plusieurs étapes comme représenté dans la Figure 11-4. Le retrait des colis s'effectue par une inversion du processus.

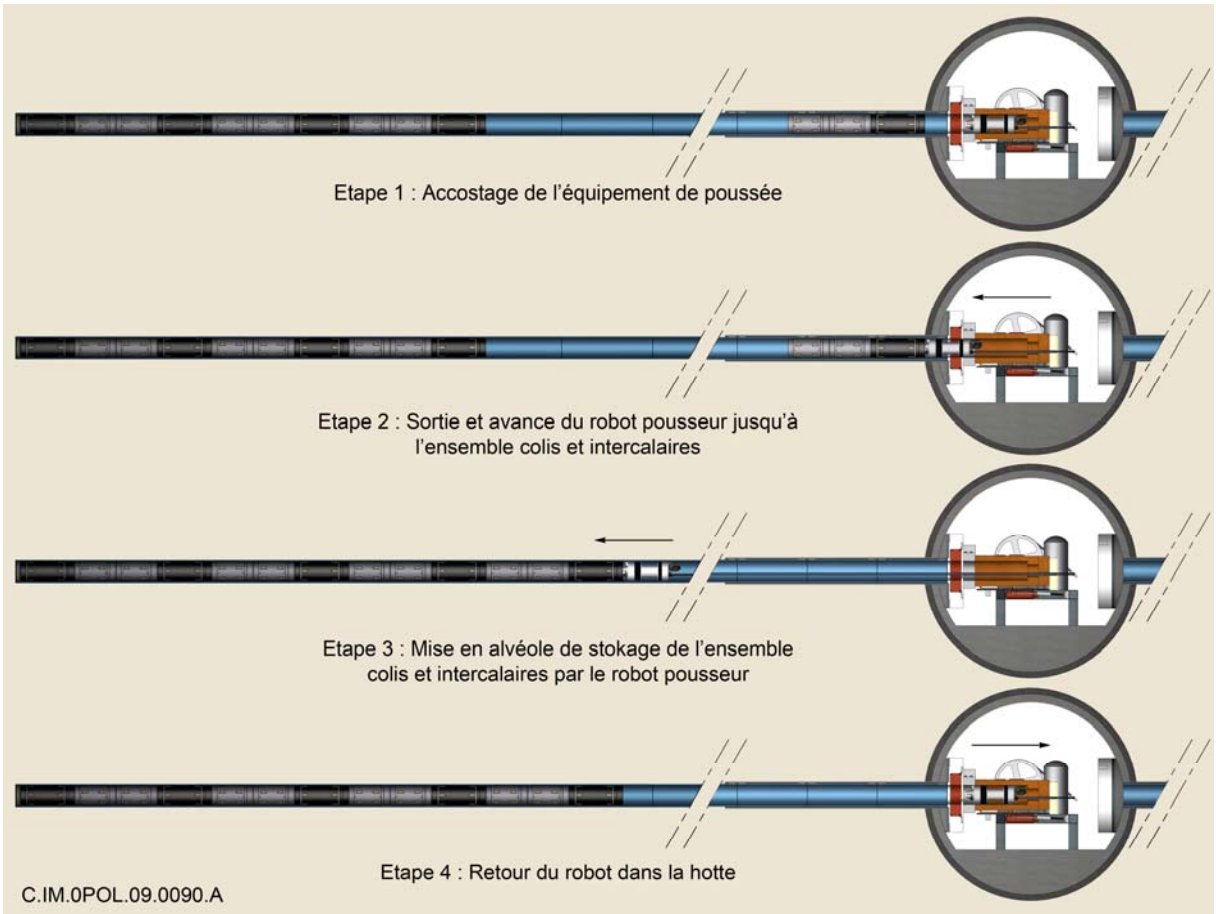


Figure 11-4 Cycle de mise en position de stockage de plusieurs colis (cas de colis séparés par deux intercalaires)

11.4 Essais technologiques

La solution proposée avec une introduction de colis par une chaine pousseuse puis une mise en position de stockage de plusieurs colis dans l'alvéole, s'appuie sur des essais technologiques menés par l'Andra.

11.4.1 Essais d'introduction et d'extraction de colis par une chaîne pousseuse

Des essais ont été réalisés dans une maquette d'alvéole HA à l'échelle 1. Les résultats des essais ont confirmé l'efficacité et la simplicité de ce procédé.

L'inspection des colis en fin du programme d'essais n'a pas montré d'altération des patins et de déformation des colis.

Figure 11-5 Banc d'essais de poussée par chaîne pousseuse

11.4.2 Essais de mise en place et de retrait de colis par un robot

Des essais de mise en alvéole de colis HA par un robot pousseur pneumatique ont été menés sur une maquette à l'échelle 1 dans le cadre du projet européen Esdred.

Ils ont permis de vérifier l'aptitude du système à mettre en place des colis[20] dans une maquette d'une centaine de mètres de longueur, et à les extraire pour les ramener en tête d'alvéole. Ces essais ont permis de spécifier les besoins nécessaires à la mise en œuvre de ce système (débit d'air…) et à caractériser les performances d'un tel système (vitesse d'avancement…).

Le robot pousseur a aussi été testé dans des situations de récupération de colis.

Pour évaluer la capacité du système à récupérer des colis dans une hypothèse pénalisante de fortes déformations différées de l'alvéole, les bancs d'essais permettaient de simuler des défauts géométriques importants du chemisage : défaut de passage (éloignement de deux tronçons de chemisage), défaut d'alignement angulaire entre tronçons, défaut d'alignement transversal. Ces situations n'ont conduit à aucune difficulté particulière pour le retrait de colis.

[20] Des essais de poussée de 1, 2 ou 3 colis ont été réalisés dans le cadre de la démonstration.

Figure 11-6 *Démonstrateur de mise en alvéole de colis HA par robot pousseur : vue d'ensemble (en haut) et vue du robot pousseur (en bas)*

12

Les ouvrages de fermeture du stockage

12.1	*Objectifs fonctionnels*	*98*
12.2	*Options de conception*	*98*
12.3	*Les solutions présentées*	*99*
12.4	*Essais technologiques*	*105*

12.1 Objectifs fonctionnels

Les ouvrages de fermeture, par leurs fonctions mécaniques ou hydrauliques, contribuent aux fonctions de sûreté du stockage après sa fermeture :

- La fonction mécanique consiste à long terme à limiter les déformations induites par le stockage dans l'argilite après dégradation des revêtements en béton des ouvrages ;
- La fonction hydraulique consiste à s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage. Il s'agit d'éviter que les galeries souterraines et les ouvrages de liaison surface – fond ne constituent un court circuit hydraulique de la formation d'argilites.

La fermeture doit pouvoir s'opérer de façon progressive pour les différents modules d'une zone, d'une zone à l'autre, puis pour les ouvrages de liaison après des périodes plus ou moins longues d'observation. Le retour en arrière dans une zone fermée par un scellement, qui nécessitera la déconstruction des scellements et le déblaiement du remblai, reste possible.

12.2 Options de conception

12.2.1 Les scellements

La fonction spécifique des scellements est hydraulique. La performance hydraulique des scellements implique d'assurer deux autres conditions : une perméabilité la plus faible possible de l'argilite en champ proche et une faible transmissivité de l'interface entre le scellement et l'argilite.

La première condition implique de préserver au mieux l'argilite de l'endommagement et de favoriser son retour à une faible perméabilité. Limiter au mieux l'endommagement s'applique à la réalisation de la galerie et à la mise en place du scellement. L'apparition d'une zone fracturée doit si possible être évitée au terme de ces opérations. Si une zone fracturée apparaît, elle doit être interrompue autant que possible au droit du scellement pour limiter un éventuel court circuit. Le retour à une plus faible perméabilité de l'argilite peut s'opérer à terme par des processus liés à sa resaturation : gonflement et fluage. Ces processus y concourent d'autant mieux que l'argilite est mécaniquement confinée (déformations convergentes bloquées). Les matériaux de scellement doivent donc limiter les déformations de l'argilite.

La deuxième condition (faible transmissivité de l'interface entre scellement et argilite) implique une bonne maîtrise de la construction du scellement dans cette zone. L'épaisseur de l'interface où les propriétés des matériaux sont dégradées doit être limitée au maximum. La perméabilité dans cette zone doit être la plus proche de la perméabilité du scellement au cœur du noyau.

Les scellements seront des ouvrages décamétriques à pluridécamétriques (en fonction de leur section) à base d'argile gonflante. Ils sont constitués d'un noyau gonflant, confiné mécaniquement par des massifs en béton et des remblais d'appui. La pression de gonflement de l'argile doit être suffisante pour assurer un contact intime avec l'argilite (>1MPa) ; pour autant, elle ne doit pas induire une extension de la roche qui l'amène à la rupture par traction (<12MPa).

L'obtention d'une faible perméabilité à l'échelle d'un scellement demandera des dispositions particulières. Celles-ci concernent le choix du matériau du noyau et sa mise en place mais également son interface physique avec l'argilite et le traitement éventuel de la zone endommagée qui est fonction des caractéristiques du terrain et du mode de réalisation des ouvrages.

12.2.2 Le remblai des ouvrages souterrains

Les parties des galeries et des ouvrages de liaison non occupées par des scellements seront intégralement remblayées pour assurer la fonction mécanique de la fermeture. Le remblai est constitué de l'argilite excavée au moment du creusement et entreposé en verse. On cherche à minimiser les taux de vide résiduels et à obtenir une portance (rigidité) la meilleure possible.

12.3 Les solutions présentées

12.3.1 Description et mise en place de scellements en puits

Les différents ouvrages et leurs principaux procédés de réalisation sont présentés en focalisant sur les aspects qui conditionnent leurs performances aux différentes échelles de temps.

12.3.1.1 Structure générale des ouvrages

Les ouvrages de fermeture d'un puits comportent, dans l'ordre de leur réalisation, les éléments suivants (cf. Figure 12-1) :

- un remplissage des divers ouvrages en base de puits ;
- un noyau d'argile gonflante, constituant le cœur du scellement d'isolation du puits ;
- un massif d'appui en béton, pour confiner le noyau d'argile gonflante ;
- un remblai jusqu'au scellement suivant ;
- un scellement séparant les formations plus perméables, scellement lui-même composé d'un noyau d'argile encadré par des massifs d'appui en béton ;
- un remblai jusqu'en tête de puits.

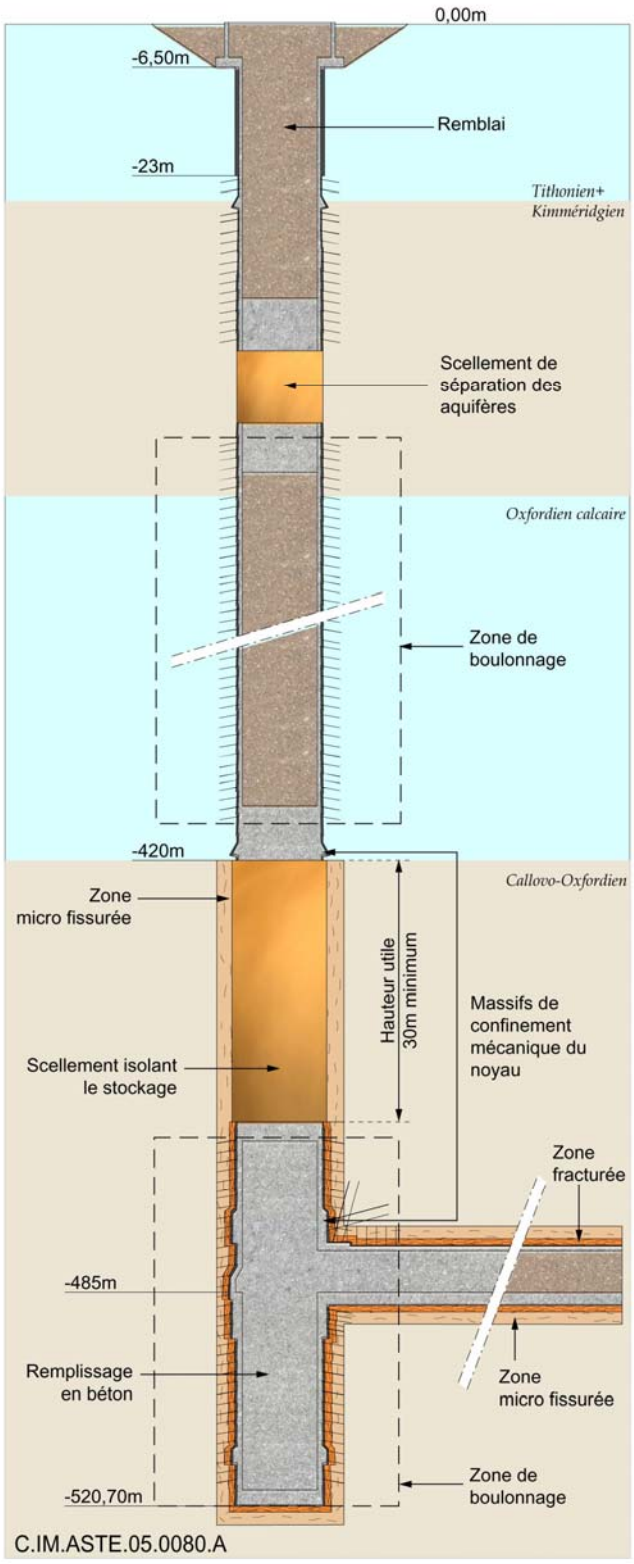


Figure 12-1 Coupe schématique d'un scellement de puits

12.3.1.2 Scellement d'isolation

Un scellement d'isolation est constitué d'un noyau à base d'argile gonflante. Il est situé en partie supérieure de la formation des argilites du Callovo-oxfordien, sur une hauteur de 30 à 40 m.

La solution de référence comporte une dépose du revêtement et du soutènement du puits sur toute la hauteur du scellement. Les dispositions présentées s'inscrivent dans une démarche prudente, veillant à limiter les déformations de l'argilite.

La dépose se fait par passes de quelques mètres, avec mise en place simultanée de l'argile gonflante. Ce phasage est réalisé de façon à garantir à la fois la sécurité du chantier, la stabilité de l'ouvrage et un certain confinement mécanique de l'argilite. La suppression du revêtement sur une partie du puits induit un report de charges sur les portions voisines de revêtement laissées en place. Ces portions de revêtement sont confortées pour résister à cet effort supplémentaire. Des anneaux de confortement sont placés en limite de la portion de revêtement à déposer. Dans la solution de référence, ces anneaux sont provisoires ; ils sont équipés de vérins assurant leur calage au terrain et leurs déplacements (de manière analogue au « soutènement marchant » utilisé en exploitation minière).

Une fois ces anneaux de confortement posés, il est possible de procéder au découpage du revêtement et du soutènement, par passes de 1 à 2 m de hauteur. Les deux plans horizontaux qui encadrent l'anneau à déposer sont sciés à la haveuse. Des découpes verticales sont ensuite réalisées afin de scinder l'anneau en blocs, permettant leur dépose. Ces découpes sont réalisées par des forages parallèles et jointifs. Cette technique est adaptée au régime de contraintes compressif régnant dans le plan horizontal de l'anneau de béton.

Après dépose du béton, il est possible de purger la surface de l'argilite qui apparaîtrait fracturée ou altérée par les travaux de dépose.

Le noyau du scellement serait constitué d'argile gonflante de type MX80 (bentonite sodique naturelle). La densité sèche de l'argile est choisie de façon à obtenir une pression de gonflement restant, au cours de son évolution, dans le domaine ciblé compris entre 1 et 7 MPa (et en tout état de cause, inférieure à 12 MPa).

Plusieurs techniques sont envisageables pour mettre en place l'argile gonflante : blocs préfabriqués, damage d'argile en pellets (ou en mélange pellets et poudre) et projection. Elles permettent toutes d'obtenir les densités sèches globales recherchées. Les solutions avec pellets et poudre nécessitent à cet effet un fort compactage en place ; les meilleures cadences de mise en place escomptées avec les blocs préfabriqués tendent à privilégier cette solution aujourd'hui. Les blocs préfabriqués sont constitués d'argile gonflante, pure ou mélangée avec du sable (jusqu'à 30 % de sable). La densité sèche de chaque bloc est de l'ordre de 1,7 à 1,9 (densité sèche de la brique en argile pure, ou densité sèche de la fraction argileuse en cas de mélange avec du sable).

On estime que la perméabilité du noyau d'argile gonflante ainsi constitué, après resaturation, est inférieure à 10^{-11} m/s.

12.3.1.3 Le massif d'ancrage en béton

Un massif de confinement en béton, placé vers la limite supérieure de la formation d'argilites termine le scellement d'isolation du stockage. En solution de référence, ce massif de béton est ancré dans les horizons plus calcaires de l'Oxfordien. Sa forme tronconique et son épaisseur lui permettent de travailler uniquement en compression, pour confiner le noyau gonflant. La réalisation de l'ancrage (dépose de l'anneau de revêtement et excavation de l'argilite) induit des reports de charges sur les revêtements voisins. Des renforts du revêtement sont réalisés de part et d'autre du massif. Ces renforts sont constitués d'un disque plein (renfort inférieur) ou d'un anneau (renfort supérieur). Le coulage du premier disque nécessite d'interposer un coffrage perdu entre le béton frais et l'argile gonflante.

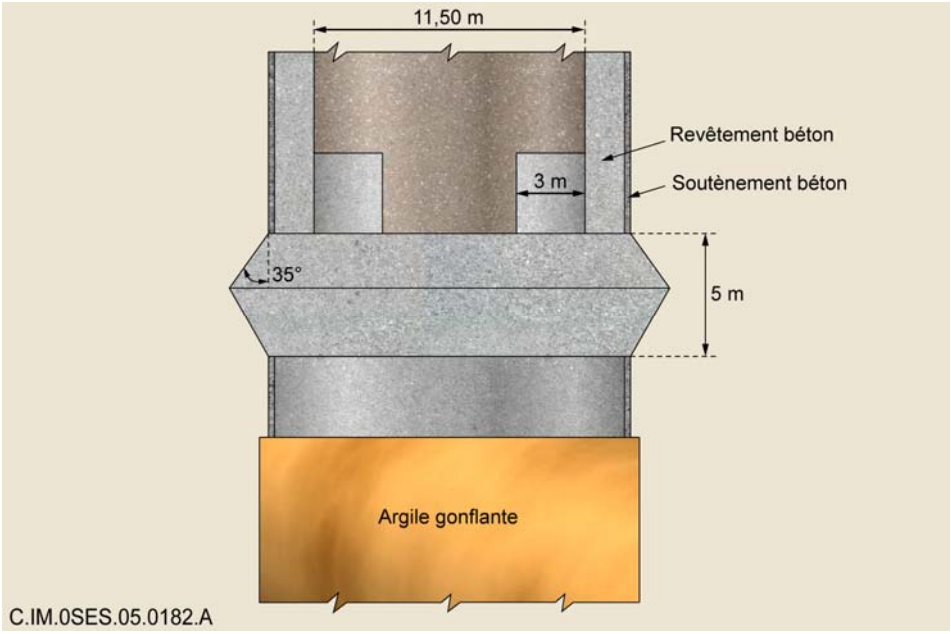


Figure 12-2 Massif d'ancrage en béton au sommet du noyau d'argile gonflante

Le massif en béton est coulé en place après dépose du revêtement et réalisation d'une surexcavation tronconique dans le terrain à l'aide d'un brise roche hydraulique ou d'une haveuse. Le béton des massifs et des anneaux est, comme précédemment, acheminé à partir de la surface par une conduite ; un plastifiant est ajouté au béton. Les plots de bétonnage pourraient atteindre environ 1,5 m de hauteur.

La hauteur du massif de béton, hors renforts, est de l'ordre de 5 m pour un puits de 11,5 m de diamètre utile.

12.3.1.4 Scellement de séparation avec les formations sus jacentes

Le scellement séparant les formations plus perméables est mis en place dans le niveau marneux à la base du Kimméridgien. Ce scellement est constitué d'un noyau d'argile gonflante, d'une longueur décamétrique, encadré de deux massifs de confinement en béton. Le matériau du noyau est identique à celui du scellement d'isolation du stockage. Sa construction peut s'effectuer de la même façon. Le revêtement est déposé sur toute la hauteur du noyau, en recourant également à des procédés identiques à ceux du scellement précédent.

La perméabilité du noyau est de l'ordre de 10^{-11} m/s, de même que le scellement d'isolation du stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien.

12.3.2 Description et mise en place de scellements en galeries

Les scellements établis dans les galeries de liaison et dans les galeries inclinées (descenderie) comportent, dans l'ordre de leur réalisation, les éléments suivants (de gauche à droite sur la Figure 12-3 ci après) :

1. un remblai d'appui amont ;
2. un massif d'appui amont en béton ;
3. un noyau à base d'argile gonflante ;
4. un massif d'appui aval en béton ;
5. un remblai d'appui aval.

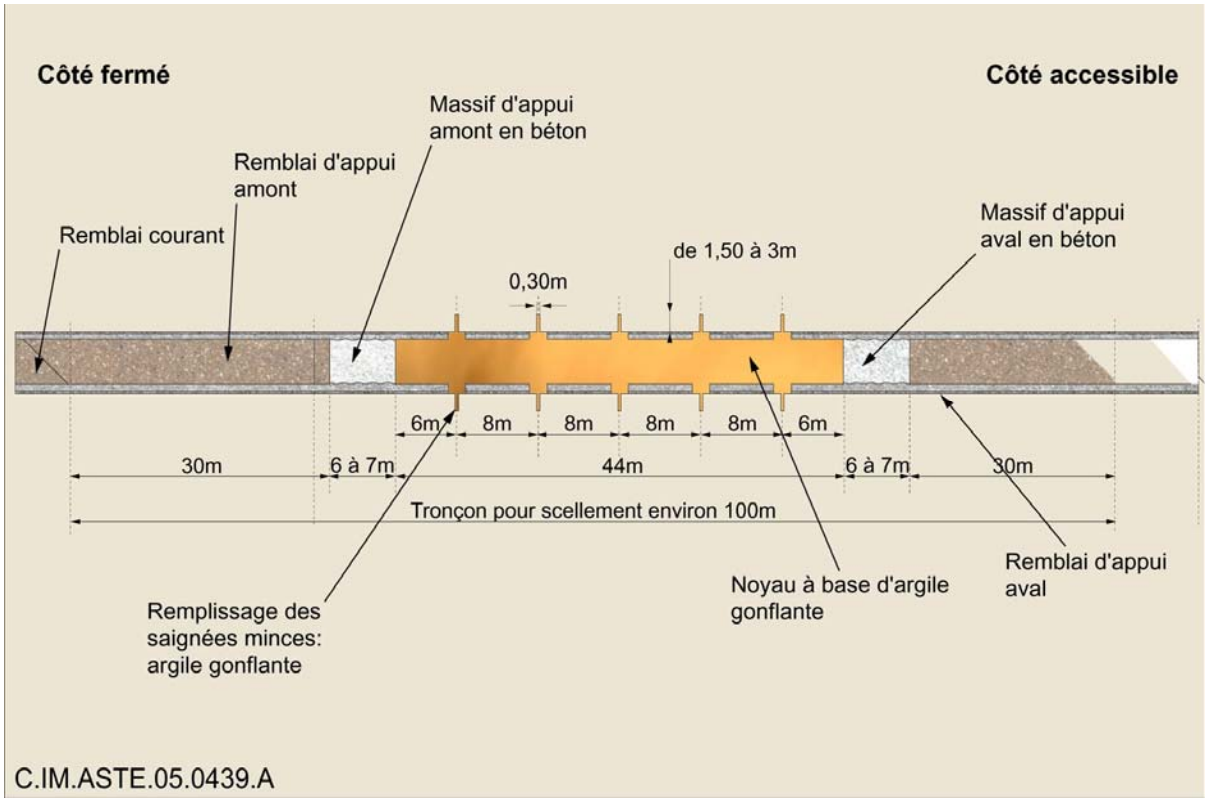


Figure 12-3 Coupe longitudinale schématique d'un scellement de galerie avec saignées de coupure hydraulique

Les divers constituants du scellement sont décrits en commençant par le cœur (le noyau d'argile) et en progressant vers les ouvrages périphériques d'appui. Les procédés de fabrication sont également précisés pour les composants considérés.

12.3.2.1 Le noyau gonflant

Le cœur du scellement est constitué d'un noyau à base d'argile gonflante, de faible perméabilité. Comme pour les scellements de puits, l'argile gonflante retenue pour l'étude est de type bentonite sodique naturelle (MX80 ou équivalent). L'argile peut être utilisée pure ou mélangée à du sable en différentes proportions ; cette possibilité permet d'obtenir les pressions de gonflement voulues, par différents modes de mise en forme et de mise en place. Une solution recourt à des blocs préfabriqués obtenus par pressage. Ils sont constitués d'un mélange d'argile gonflante et d'environ 30 % de sable quartzeux. L'ajout d'un sable adapté (nature et granulométrie), dans des proportions massiques n'excédant pas 30 %, renforce la résistance mécanique des blocs. La densité sèche des blocs est de l'ordre de 1,7 à 1,9 (densité sèche du bloc en argile pure, ou densité sèche de la fraction argileuse en cas de mélange avec du sable).

Pour industrialiser leur mise en place, les blocs préfabriqués peuvent être de plus grandes dimensions que ceux mis en œuvre dans le cadre des essais réalisés (expérimentations TSX, EZ-A). On considère ainsi des blocs de 50 cm de côté ; ils pourraient être assemblés les uns aux autres par un système de cordons et de gorges sur leurs faces horizontales pour faciliter leur positionnement. Les vides annulaires entre le massif de briques et les parements de la galerie sont comblés par de la poudre d'argile gonflante. Par analogie avec l'expérience TSX, la densité sèche en place moyenne, compte tenu des hétérogénéités initiales de densité, est évaluée à 1,8. La densité sèche correspondante pour la fraction argileuse est d'environ 1,6.

Par ailleurs, le noyau peut être complété par des coupures hydrauliques radiales, à intervalles réguliers ; elles consistent en des saignées minces remplies d'argile gonflante. Elles interrompent le revêtement et la zone fracturée d'argilite. Le revêtement est conservé entre deux saignées. Cette solution assurerait la faisabilité des scellements sous des hypothèses défavorables de comportement

des argilites : apparition d'une zone fracturée, non refermeture des fissures par fluage ou gonflement de l'argilite.

Les saignées des coupures hydrauliques sont réalisées avant mise en place du noyau. Le revêtement de la galerie est déposé sur une longueur de 1,30 m environ, au droit des coupures. La coupure hydraulique est ainsi séparée du béton de part et d'autre par une distance de 0,50 m environ ; cette disposition limite la perturbation alcaline de l'argile gonflante (pour assurer le maintien d'un potentiel de gonflement suffisant). Le volume de revêtement déposé est également rempli d'argile gonflante ; il est ci après désigné par le terme « épaulement » de la saignée.

La réalisation des saignées s'effectue en deux étapes :

1. dépose du revêtement sur la largeur de l'épaulement, par découpage d'un anneau transversal, par exemple, à la haveuse ; puis segmentation de l'anneau, par forages radiaux jointifs ;
2. creusement des saignées à l'aide d'une haveuse dont le bâti permet un positionnement adéquat de la scie (cf. Figure 12-7).

Par ailleurs, une alternative aux saignées d'interruption de l'EDZ[21] consisterait à procéder à une dépose du revêtement et à mobiliser la capacité de cicatrisation de l'argilite avec la compression des fissures par le gonflement du noyau d'argile gonflante.

12.3.2.2 Les massifs d'appui en béton

Un massif d'appui en béton non armé est réalisé à chaque extrémité du noyau. Ces massifs ont pour rôle d'assurer le confinement mécanique du noyau gonflant. Chacun de ces deux massifs de béton a une longueur de 4 à 6 m.

Différentes solutions peuvent s'envisager pour assurer la stabilité mécanique des massifs d'appui face à la poussée de l'argile gonflante ; ces solutions sont présentées dans la Figure 12-4 ci après.

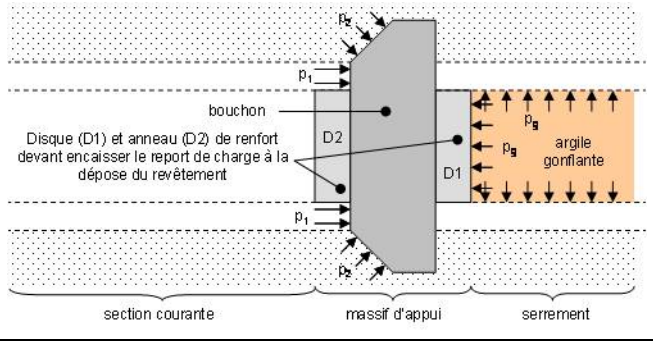
Description	Schéma
Massif s'appuyant contre le revêtement ou sur le terrain L ≈ 6 m	

Figure 12-4 Exemple de dispositifs envisageables pour assurer la stabilité des massifs d'appui

Dans tous les cas, les surfaces de revêtement en contact avec le massif d'appui sont repiquées. Les massifs d'appui sont bétonnés en continu pour éviter les reprises de bétonnage. Il en est de même pour les anneaux et disques de renfort éventuels. L'interface entre le massif et son appui est injectée pour assurer un bon contact.

12.3.3 Le remblai courant en galerie

Les remblais courants occupent intégralement les tronçons de galerie situés entre les scellements (et leurs remblais d'appui).

[21] EDZ (« Excavated Damaged Zone ») : zone où les perturbations hydromécaniques et géochimiques induites par le creusement induisent des variations significatives sur les propriétés hydrauliques et de transport de la roche hôte.

Dans la solution proposée en référence, le remblai courant est constitué d'argilite excavée, sans additif. Elle est reconditionnée après stockage en verse, par broyage et criblage à 20 mm, à une teneur en eau voisine de l'optimum Proctor normal (12 à 15 % d'eau en poids). Son potentiel de gonflement est de un à quelques % pour une densité sèche à la mise en œuvre d'environ 1,7 (réalisable par compactage en place).

L'argilite étant réactive à l'eau, des dispositions limitant son exposition aux intempéries sur la verse pourraient s'avérer nécessaires (ces procédés, tel un compactage de la couche externe de la verse, n'ont pas été étudiés à ce stade). L'étude de la verse du tunnel de Chamoise montre que l'imbibition par l'eau de pluie reste superficielle. Si cette imbibition s'avérait trop importante, le traitement pourrait inclure un séchage préalable.

La mise en place du remblai est effectuée par couches horizontales en base de galerie, puis en couches inclinées pour la partie supérieure (Figure 12-5).

Les couches horizontales sont amenées à la densité visée par compactage ; l'engin de compactage doit être de faible encombrement ; l'épaisseur des couches fait l'objet d'un ajustement, pour optimiser l'efficacité du compactage ; c'est une méthode d'emploi courant qui n'appelle pas de remarques particulières.

La mise en œuvre en couches inclinées est plus spécifique. La solution envisagée à ce stade est la suivante : le talus est en fait constitué de plusieurs talus élémentaires de 80 cm de hauteur et décalés en paliers de 60 cm de large ; la pente des talus élémentaires est de 1H/1V à 2H/3V. Le compactage dynamique serait réalisé par une dame pneumatique, montée sur un bras de brise roche hydraulique.

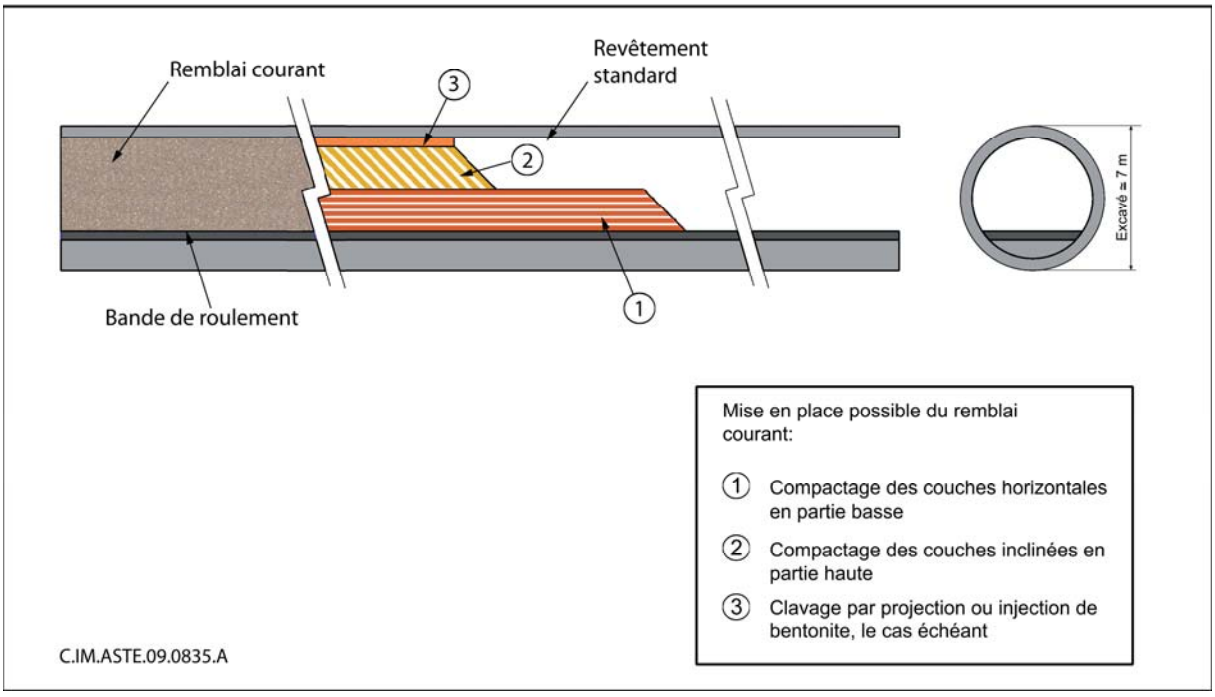


Figure 12-5 Mise en œuvre de remblai en couches inclinées

Cette méthode doit permettre d'obtenir un remplissage intégral de la galerie et une densité sèche du remblai d'environ 1,7. Elle donne au matériau un module d'Young initial de l'ordre de 10 MPa.

12.4 Essais technologiques

12.4.1 Scellements en puits

Dans le cadre de la fermeture du laboratoire de recherche souterrain canadien (laboratoire souterrain du Lac du Bonnet), les opérations de fermeture du puits principal et du puits auxiliaire constituent des

opportunités de tester la réalisation d'ouvrages de scellement et de les instrumenter. Les deux scellements devraient être terminés d'ici mi-2010.

Les scellements, situés à une profondeur de 280 m, sont constitués de deux bouchons de béton encadrant un bouchon avec un mélange de 40 % de bentonite et de 60% de sable. Pour le puits principal (diamètre de 4,5 m), ce bouchon central est mis en place sous forme de poudre, qui est compactée in situ (cf. Figure 12-6). Pour le puits de ventilation de plus petit diamètre (1,4 m), la bentonite est introduite sous forme de briques, avec la périphérie comblée par de la poudre de bentonite. Les bouchons de béton sont de forme tronconique. Les surfaces horizontales de ces cônes, au contact avec le bouchon central, ont été obtenues par une série de forages quasi-jointifs. Le reste de la forme tronconique a été réalisée par un brise-roche. Le bouchon inférieur en béton est fortement armé (le puits est laissé vide sous l'ensemble du scellement, tant pour le puits principal que pour le puits secondaire). Les bouchons supérieurs en béton seront réalisés sans ferraillage.

Le scellement du puits principal est instrumenté. En particulier, la saturation de la bentonite sera suivie durant plusieurs années.

L'Andra a participé à ces opérations, en particulier à la campagne d'instrumentation.

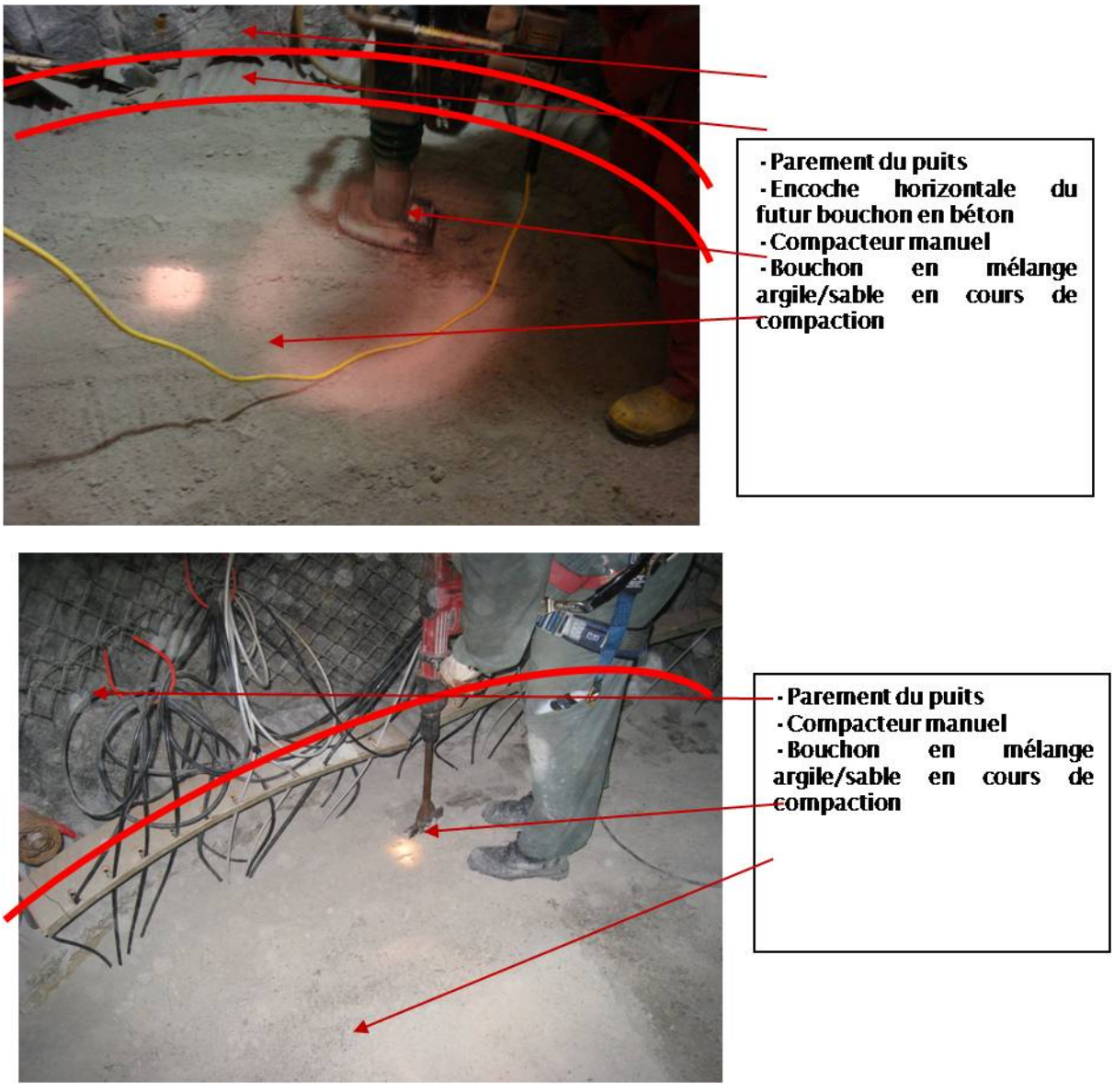


Figure 12-6 *Compactage du mélange bentonite/sable dans le scellement du puits principal de l'URL (Canada)*

12.4.2 Scellements en galeries

Compte tenu de la taille et de la complexité d'un ouvrage de scellement, le programme expérimental prévoit d'en tester d'abord les différents composants (interruption de l'EDZ, noyau de scellement en argile gonflante et massif d'appui en béton) séparément. Les résultats des essais réalisés sur les composants élémentaires du scellement permettront ensuite d'envisager la réalisation d'un pilote préindustriel de l'ensemble de l'ouvrage de scellement.

Dans une première étape, les expérimentations KEY réalisées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ont concerné les saignées radiales de faible épaisseur utilisées comme coupure hydraulique dans les scellements de galerie. Leur but était de :

- montrer la faisabilité de réalisation de saignées,
- montrer la faisabilité d'un remplissage d'une saignée par des briquettes d'argile gonflante,
- évaluer l'efficacité des saignées radiales vis-à-vis de la problématique de court circuit hydraulique,
- vérifier l'efficacité de l'application d'une pression de gonflement dans la saignée.

Figure 12-7 *Scie à bâti ajustable construite pour l'essai de coupure hydraulique KEY (Andra - laboratoire de Meuse/Haute-Marne)*

Les mesures réalisées pendant la phase précédant la mise en place du système de confinement et le début de la phase d'hydratation de la bentonite mettent en évidence que, malgré le remplissage de la saignée avec des briquettes de bentonite, les parements de la saignée ont continué à converger. Ceci montre que le taux de vide initial était important dans la saignée.

Après quelques mois, la teneur en eau (massique) moyenne dans la saignée était de l'ordre de 20 % montrant que la bentonite n'est pas totalement saturée. La pression moyenne à l'interface bentonite – roche, qui augmente au cours de l'hydratation, a atteint 2,9 MPa. La phase d'hydratation se poursuit actuellement afin de connaître le potentiel de gonflement du système (gonflement de la bentonite + gonflement de l'argilite) ainsi que l'impact sur le comportement hydromécanique au voisinage de la saignée.

On confirmera pour 2015 la possibilité de creuser une saignée radiale, de géométrie précise sur tout le pourtour d'une galerie. Dans un second temps, un procédé de remplissage de la saignée avec de l'argile gonflante pourra être testé. Une expérimentation de confinement mécanique de l'EDZ par compression, mise en œuvre dès 2011, permettra de tester d'ici 2015 la possibilité de cicatriser l'EDZ. Suite à cette expérimentation, un essai de dépose du revêtement pourra être envisagé dans le Laboratoire.

Concernant la construction du noyau de scellement, l'objectif est d'évaluer d'ici 2015 la méthode de mise en place du matériau constituant le noyau. Au-delà de l'aspect pré-industrialisation du procédé de construction, on regardera notamment son impact sur l'interface scellement – argilite, dont l'expérience réalisée dans le laboratoire souterrain de Lac du Bonnet (Canada) a mis en évidence

l'importance pour les performances de l'ouvrage. Pour cela, on construira dans un rameau de galerie un tronçon de noyau, suivant un procédé proche de celui qui est envisagé pour l'ouvrage de scellement. Comme dans le cas du bouchon d'alvéole HA, on procèdera ensuite à des tests de performance du noyau en vraie grandeur *in situ* (comportement de l'interface argilite/noyau sous une pression hydraulique, perméabilité globale du noyau), qui nécessiteront sa resaturation complète, si besoin par des moyens artificiels. On suivra la poussée due au gonflement de l'argile du noyau. La resaturation artificielle du noyau demande plusieurs années et est complexe à mettre en œuvre. Les résultats du test de performance seront disponibles à l'horizon 2025.

12.4.3 Remblayage en galerie

Un démonstrateur de remblayage a été réalisé par l'Andra. Environ 200 m^3 de remblais ont été mis en œuvre dans un tube de béton (simulant une galerie de stockage) qui est l'ouvrage principal du démonstrateur. Le remblai est composé d'argilites du Callovo-Oxfordien du site de Meuse / Haute-Marne, prélevées sur la verse des déblais du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

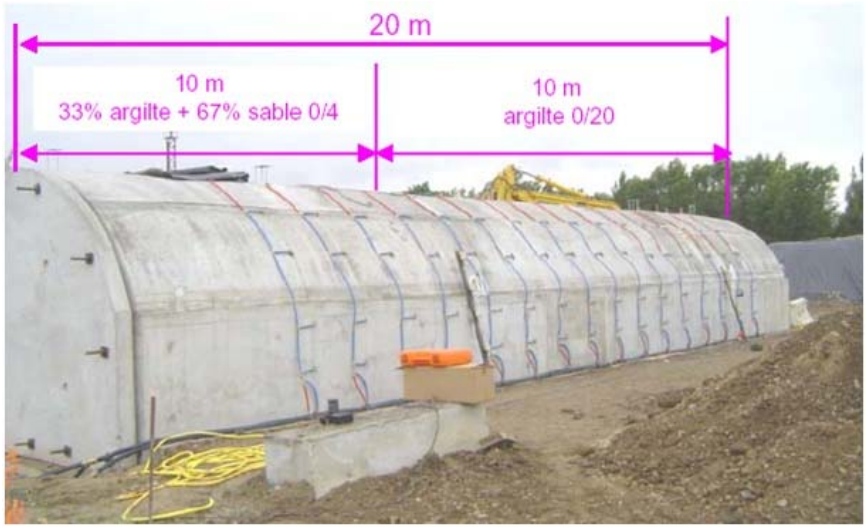


Figure 12-8 Répartition des matériaux mis en place dans le démonstrateur

La technique utilisée, fondée sur la percussion à la plaque de petites dimensions, a apporté satisfaction en termes de densité sèche. Même si des hétérogénéités ont été constatées, il n'a pas été observé de baisse notoire de densité à proximité de la voûte.

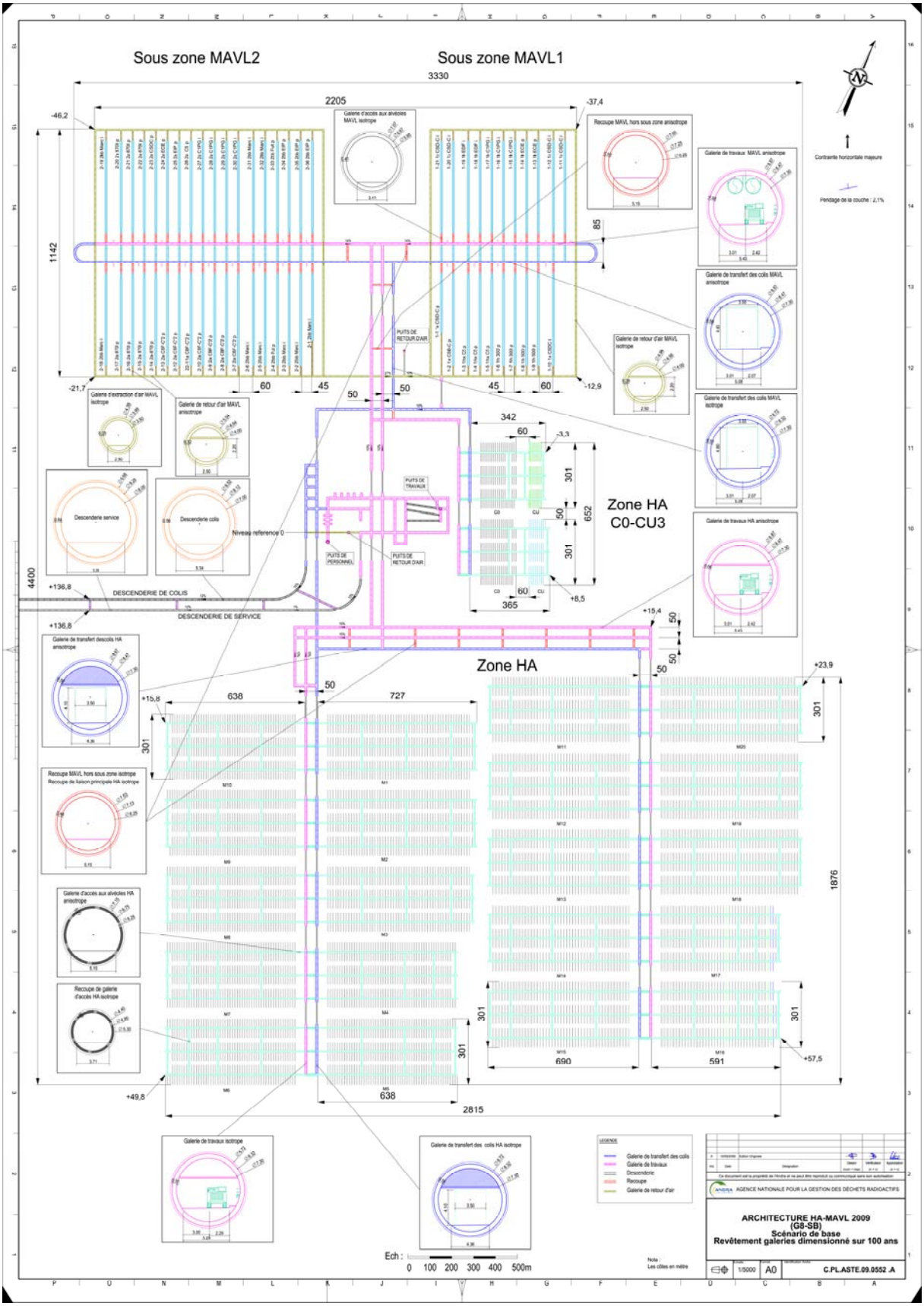
Les modules de déformation sont relativement faibles et témoignent d'une plastification du remblai liée au mode de chargement.

Les modules élastiques (modules de Young) obtenus sont d'environ 60 MPa pour le mélange argilite – sable, et d'environ 40 MPa pour les argilites pures d'après les essais pressiométriques.

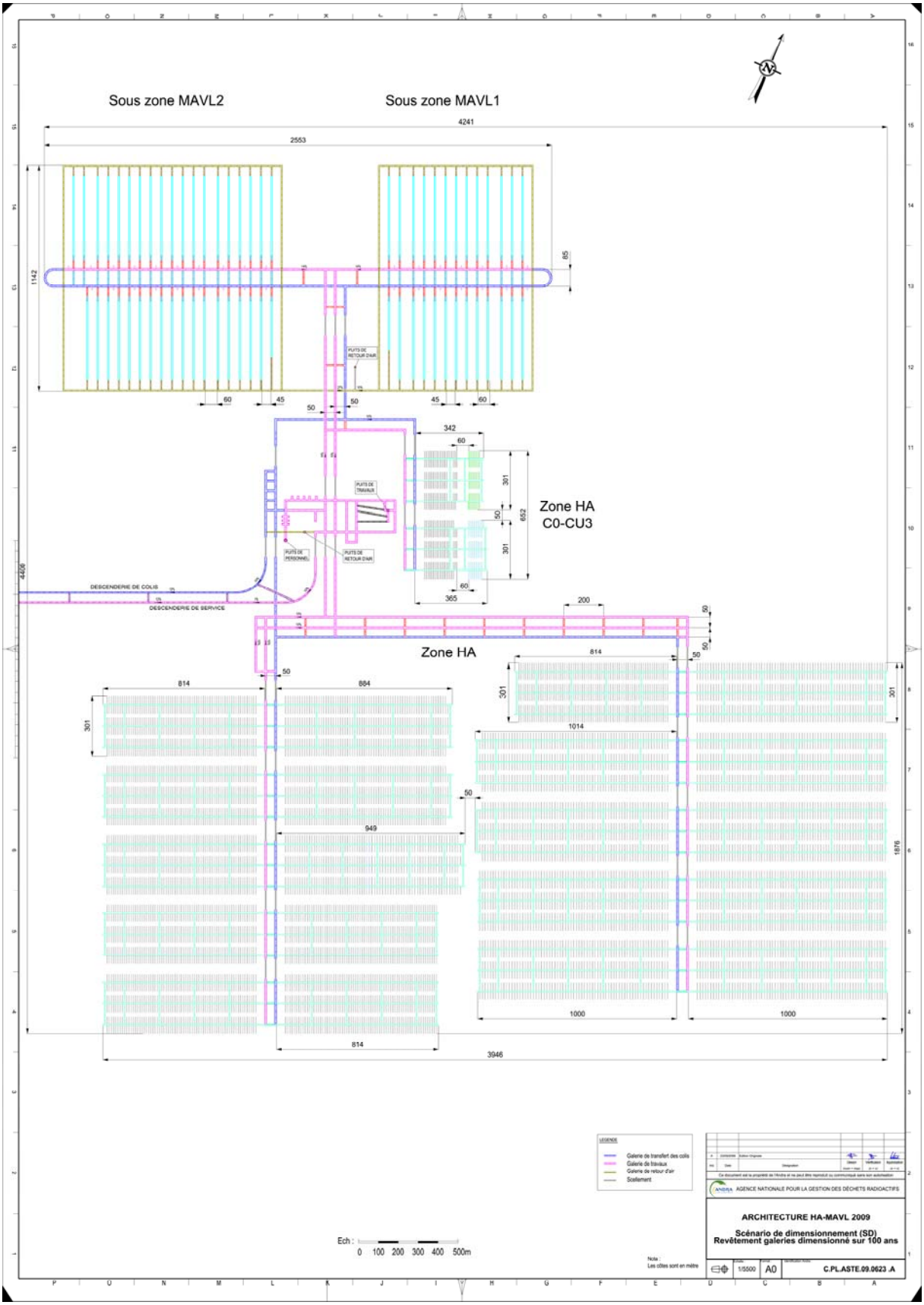
D'autres essais pourront être envisagés au Laboratoire souterrain ou en surface après 2015, par exemple concernant la technique de mise en place du remblai. L'évolution des matériaux de déblais (argilites) stockés sur la verse du Laboratoire sera suivie à partir de prélèvements d'échantillons à différentes profondeurs à intervalles de temps réguliers. Par ailleurs, des planches d'essais avec les argilites excavées prélevées dans la verse après quelques années d'entreposage pourront être réalisées pour caractériser leur mise en œuvre et leur comportement mécanique, éventuellement après mélange avec d'autres matériaux.

ANNEXES

Annexe 1 : Architecture correspondant au scénario de base du modèle d'inventaire 2009



Annexe 2 : Architecture correspondant au scénario de dimensionnement du modèle d'inventaire 2009



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andra (2005a) Dossier 2005 Argile – Synthèse : évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. www.andra.fr/index.php?id=edition_1_1_1&recherche_thematique=2

Andra (2005b) Dossier 2005 Argile - Tome architecture et gestion du stockage géologique ; Rapport Andra n° C.RP.ADP.04.0001.

Andra (2009a) Inventaire des capacités d'entreposage existantes, état d'avancement des études de concepts d'entreposage, propositions d'options à étudier après 2009 ; Rapport Andra n° C.RP.ADP.08.0038.

Andra (2009b) Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde ; Rapport Andra n° C.NT.ASSN.09.0029.

Andra (2009c) Options de réversibilité du stockage en formation géologique profonde. Rapport Andra n° C.NT.AHVL.09.0005.

Andra (2009d) Référentiel de connaissances et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et moyenne activité à vie longue ; Rapport Andra n° C.RP.AHVL.09.0114.

Andra (2009e) Référentiel du site Meuse/Haute-Marne ; Rapport Andra n° C.RP.ADS.04.0022.

Andra (2009f) Stockage réversible profond – Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface ; Rapport Andra n° C RP ADP 09 0035.

Autorité de sûreté nucléaire (2008) Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. www.asn.fr/sites/default/files/files/guide_RFSIII_2_fV1_2_.pdf

Commission nationale d'évaluation (2006) Rapport global d'évaluation des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.

Décret n° 2008-357 du 16 avril 2008 pris pour l'application de l'article L. 542-1-1 du code de l'environnement et fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs.

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

Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs.

UNE VISITE GRATUITE ?

APPELEZ LE

N° Vert 0 805 107 907

APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

ANDRA

La maîtrise des déchets radioactifs

AGENCE NATIONALE
POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
Centre de Meuse/Haute-Marne
Route départementale 960
BP 9 - 55290 Bure
N° Vert 0 805 107 907
APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE
www.andra.fr

394 • Septembre 2010 • 100 exemplaires • DCOM-10-0109 • Conception graphique et réalisation : Pascal Lemercier • Crédits photos : Polynotes
Impression certifiée Imprim'Vert avec des encres végétales sur un papier partiellement recyclé, certifié FSC • Gratuit - Ne peut être vendu