

Dossier 2005 Argile Tome

Architecture et gestion du stockage géologique

Juin 2005



ANDRA

Agence nationale
pour la gestion des déchets radioactifs

Sommaire

Sommaire	3
Tables des illustrations.....	10
1 Démarche d'étude	21
1.1 L'objet du Tome dans le dossier Argile 2005	22
1.2 Les principales étapes de l'étude de la conception.....	23
1.3 Une démarche itérative	25
1.4 La structuration du tome	25
2 Description générale	27
2.1 Les déchets à haute activité et à vie longue.....	28
2.1.1 Nature et provenance des déchets HAVL	28
2.1.2 Conditionnement des déchets HAVL	29
2.2 Les fonctions d'un stockage réversible	31
2.2.1 Fonctions de sûreté d'un stockage à long terme	31
2.2.2 La réversibilité, les étapes de mise en oeuvre d'un stockage	35
2.2.3 Mise en stockage de colis de déchets.....	38
2.2.4 Objectifs de protection des personnes après fermeture.....	40
2.2.5 Protection des personnes pendant l'exploitation et l'observation d'un stockage	41
2.3 Le contexte géologique du site de Meuse/Haute Marne – La formation du Callovo-Oxfordien	42
2.3.1 Présentation générale du secteur étudié	43
2.3.2 Propriétés de la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien	46
2.3.3 Contexte hydrogéologique	50
2.3.4 Evolution géoprospective.....	51
2.4 Principes de conception de l'architecture du stockage.....	52
2.4.1 Éléments clefs de la conception des installations souterraines et des colis de stockage	53
2.4.2 Les colis de stockage et la conception des alvéoles de stockage	58
2.4.3 La configuration d'ensemble des installations souterraines.....	64
2.5 Le rôle des différents composants d'un stockage.....	66
2.5.1 Rôle des composants pour la mise en stockage réversible des colis de déchet	66
2.5.2 Rôle des composants d'un stockage vis-à-vis de ses fonctions de sûreté à long terme	69
3 Les déchets à haute activité et à vie longue.....	71
3.1 La production de déchets HAVL, les scénarios d'étude.....	72

3.2	Description des colis primaires de déchets	74
3.2.1	Colis primaires de déchets B.....	74
3.2.2	Colis primaires de déchets C vitrifiés	89
3.2.3	Combustibles usés.....	93
3.3	Le modèle d'inventaire.....	96
3.3.1	Choix des colis types, nomenclature utilisée dans la suite.....	97
3.3.2	Nombre et volume de colis primaires pris en compte.....	100
3.4	Hypothèses de flux de réception de colis primaires	103
4	Les colis de stockage	105
4.1	Les colis de stockage de déchets B.....	106
4.1.1	Exposé des questions principales.....	106
4.1.2	Principes de conception retenus.....	109
4.1.3	Description et dimensionnement d'un conteneur standard.....	116
4.1.4	Variante à capacité de rétention renforcée.....	118
4.1.5	Le béton constitutif des conteneurs de stockage.....	121
4.1.6	Techniques de fabrication.....	124
4.2	Les colis de stockage de déchets C.....	128
4.2.1	Exposé des questions principales.....	129
4.2.2	Principes de conception retenus.....	130
4.2.3	Description, performance.....	134
4.2.4	Techniques de fabrication.....	140
4.3	Les colis de stockage de combustibles usés.....	144
4.3.1	Exposé des questions principales.....	144
4.3.2	Principes de conception retenus.....	145
4.3.3	Description, performance.....	147
4.3.4	Technique de fabrication du colis de stockage	153
5	Les modules de stockage.....	159
5.1	Les modules de stockage de déchets B	160
5.1.1	Exposé des questions principales.....	160
5.1.2	Principes de conception retenus pour l'alvéole.....	164
5.1.3	Description et dimensionnement de l'alvéole et de la galerie d'accès.....	172
5.1.4	Agencement des différents types d'alvéoles de déchets B.....	183
5.1.5	Construction des alvéoles B.....	185
5.1.6	Fermeture de l'alvéole	188
5.2	Les modules de stockage de déchets C	190
5.2.1	Exposé des questions principales.....	191
5.2.2	Principes de conception retenus.....	194
5.2.3	Description et dimensionnement de l'alvéole et de la galerie d'accès en phase d'exploitation.....	201
5.2.4	Agencement des alvéoles et des galeries d'accès dans le module de stockage	217
5.2.5	Construction de l'alvéole	219
5.2.6	Fermeture de l'alvéole	224
5.3	Les modules de stockage de combustibles usés	232
5.3.1	Exposé des questions principales.....	232
5.3.2	Principes de conception retenus.....	233

5.3.3	Description et dimensionnement des modules CU1 et CU2.....	242
5.3.4	Agencement des alvéoles CU1 et CU2 dans les modules de stockage.....	253
5.3.5	Le module CU3.....	254
6	Architecture souterraine d'ensemble.....	255
6.1	Exposé des questions principales.....	256
6.1.1	Sûreté à long terme.....	256
6.1.2	Prise en compte de la réversibilité.....	258
6.1.3	Prise en compte de la sûreté opérationnelle et de la diversité des activités.....	258
6.1.4	Les quantités et flux de colis et de matières à transférer dans les installations souterraines.....	259
6.2	Conception d'ensemble.....	262
6.2.1	Organisation générale du stockage.....	262
6.2.2	Modularité des zones de stockage.....	263
6.2.3	Accès aux zones de stockage.....	263
6.2.4	Agencement général du stockage.....	264
6.2.5	Description de la zone de stockage de déchets B.....	265
6.2.6	Description des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés.....	266
6.2.7	Adaptabilité à une éventuelle discontinuité du milieu.....	267
6.2.8	Éléments de comparaison internationale.....	267
6.3	Facteurs de dimensionnement de l'architecture.....	268
6.3.1	Aspects géotechniques.....	268
6.3.2	Comportement thermique du stockage.....	269
6.3.3	Comportement hydraulique du stockage.....	271
6.4	Logique de construction et d'exploitation d'ensemble du stockage.....	274
6.4.1	La séparation des activités.....	274
6.4.2	La progressivité de la construction et de l'exploitation d'une zone de stockage.....	275
6.4.3	L'organisation des activités de construction.....	277
6.4.4	La ventilation.....	278
6.5	Dimensionnement des infrastructures de liaison.....	284
6.5.1	Diamètre des galeries d'accès et nombre de galeries.....	284
6.5.2	Distance entre galeries de liaison.....	284
6.5.3	Connexions entre galeries de liaison.....	284
6.5.4	Exemples de dimensionnement préliminaire des infrastructures de liaison.....	285
6.6	Adaptation de l'architecture souterraine à différents scénarios.....	286
6.6.1	Généralités.....	286
6.6.2	Présentation de l'architecture d'ensemble d'un stockage pour le scénario S1a.....	286
6.6.3	Adaptation de l'architecture aux scénarios S1b, S1c, S2.....	288
6.6.4	Flexibilité de l'architecture vis-à-vis de l'inventaire et de la gestion des déchets.....	290
6.6.5	Sensibilité de l'emprise du stockage à la durée d'entreposage préalable.....	291
7	Les puits et les galeries.....	293
7.1	Exposé des questions principales.....	294

7.1.1	Besoins opérationnels	294
7.1.2	Réversibilité et sûreté à long terme.....	294
7.2	Principes de conception retenus	295
7.2.1	Puits ou descenderie.....	295
7.2.2	Nombre et affectations des puits.....	296
7.2.3	Principes de conception des galeries de liaison et d'accès	296
7.3	Description des puits.....	296
7.3.1	Puits de transfert des colis.....	296
7.3.2	Puits de retour d'air.....	299
7.3.3	Puits de personnel et puits de service.....	299
7.3.4	Intérêt d'une descenderie	301
7.4	Description des infrastructures de liaison	304
7.4.1	Les infrastructures de la zone des puits	304
7.4.2	Les galeries de liaison.....	305
7.5	Construction des puits et des galeries de liaison	308
7.5.1	Construction des puits.....	308
7.5.2	Construction des galeries	311
7.6	Durabilité des ouvrages	311
7.7	Fermeture des installations souterraines	312
7.7.1	Le remblai des galeries courantes	312
7.7.2	Les scellements de galerie	313
7.7.3	Les scellements de puits.....	320
8	Les installations de surface.....	325
8.1	Organisation générale des installations de surface	326
8.2	Zone nucléaire	327
8.2.1	Logique d'ensemble de la zone nucléaire.....	327
8.2.2	Bâtiment de réception des déchets B et C et de préparation des colis de stockage	328
8.2.3	Bâtiment de surface pour réception et mise en conteneur des combustibles usés.....	329
8.3	Zone industrielle et administrative	329
8.4	Verse à déblais.....	330
9	Les moyens d'exploitation nucléaire du stockage	333
9.1	Réception des colis primaires et préparation des colis de stockage	334
9.1.1	Réception des emballages de transport, déchargement et entreposage des colis primaires de déchets.....	334
9.1.2	Préparation des colis de stockage de déchets B	336
9.1.3	Préparation des colis de stockage de déchets C	337
9.1.4	Préparation des colis de stockage de combustibles usés.....	338
9.2	Processus de transfert des colis de stockage depuis la surface jusqu'aux alvéoles de stockage	340
9.2.1	Principes généraux du transfert des colis de stockage	340
9.2.2	Les hottes de protection radiologique	341

9.2.3	Le transfert des colis dans le puits de transfert	343
9.2.4	Le transfert des hottes dans les installations souterraines	345
9.3	Processus de mise en place des colis dans les alvéoles de stockage.....	348
9.3.1	Principes généraux de la mise en place des colis en alvéoles de stockage	348
9.3.2	Description de l'équipement et du processus de mise en place des colis de déchets B	348
9.3.3	Description de l'équipement et du processus de mise en place des colis de stockage de déchets C	355
9.3.4	Description de l'équipement et du processus de mise en place des colis de stockage de combustibles usés	360
10	La gestion réversible du stockage	367
10.1	La conduite du processus de stockage par étapes	368
10.1.1	L'exploitation progressive du stockage	368
10.1.2	La fermeture progressive du stockage	369
10.1.3	Les étapes clés du processus de stockage	370
10.2	La maîtrise du comportement du stockage et la capacité d'action	371
10.2.1	Le comportement des alvéoles de déchets B.....	372
10.2.2	Le comportement des alvéoles de déchets C (ou de combustibles usés)	377
10.2.3	Le comportement des ouvrages d'accès à l'étape « après fermeture d'une zone de stockage »	384
10.2.4	Conclusion sur la durée minimale de la gestion réversible du processus de stockage.....	386
10.3	L'observation et la surveillance.....	386
10.3.1	Pourquoi observer et surveiller ?	387
10.3.2	Les paramètres à observer pendant l'exploitation du stockage.....	388
10.3.3	Situation au niveau international.....	390
10.3.4	Contraintes spécifiques de l'observation d'un stockage	392
10.3.5	Retour d'expérience industriel en matière d'observation	394
10.3.6	Logique d'observation et de surveillance	402
10.3.7	Observation des modules de stockage de déchets B	404
10.3.8	Observation des alvéoles de stockage C	409
10.3.9	Observation des alvéoles de stockage de combustibles usés	415
10.3.10	Le dispositif d'observation d'alvéoles courantes.....	416
10.3.11	Observation des galeries	416
10.3.12	Observation des puits.....	417
10.3.13	Conclusion sur l'apport de l'observation à la gestion réversible du stockage	420
10.4	La capacité de retrait des colis.....	421
10.4.1	Le retrait des colis B	421
10.4.2	Le retrait des colis de déchets C (et de combustibles usés)	428
10.4.3	Conclusion sur la capacité à retirer les colis	434
10.5	Conclusion	435
11	La sûreté opérationnelle	437
11.1	Évaluation dosimétrique en exploitation des installations	438
11.1.1	Nature des risques radiologiques et des dispositions envisagées.....	439
11.1.2	Évaluation dosimétrique sur le site et en limite de site	440

11.1.3	Conclusion	444
11.2	Analyse de risque	444
11.2.1	Méthodologie	444
11.2.2	Risques internes relatifs au processus de stockage	445
11.2.3	Risques liés à l'environnement externe du stockage.....	454
11.2.4	Synthèse	455
11.3	Étude du risque lié à l'émission de gaz explosifs par des colis de déchets B	456
11.3.1	Caractéristiques des colis de déchets	456
11.3.2	Analyse en phase d'exploitation	457
11.3.3	Analyse en phase de fermeture du stockage	457
11.3.4	Conclusion	458
11.4	Étude du risque d'incendie dans les installations souterraines du stockage	458
11.4.1	Simulations d'incendie.....	459
11.4.2	Simulation des conditions d'évacuation du personnel.....	463
11.4.3	Conclusion	465
11.5	Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de transfert des hottes (B, C et CU)	466
11.5.1	Évaluation des conséquences d'un incendie de l'engin porteur sur la hotte et son contenu	466
11.5.2	Conclusion	470
11.6	Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de manutention des colis B.....	471
11.6.1	Évaluation des conséquences thermomécaniques d'un incendie sur le colis de stockage et les colis primaires contenus	471
11.6.2	Conclusion	473
11.7	Étude des conséquences d'une chute de cage lors du transfert des colis de stockage en puits	473
11.7.1	Évaluation des conséquences mécaniques d'une chute de la cage en puits.....	475
11.7.2	Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de la cage en puits.....	477
11.7.3	Analyse du risque de criticité.....	478
11.7.4	Conclusion	479
11.8	Étude des conséquences d'une chute de colis de stockage B lors de sa mise en place en alvéoles de stockage.....	479
11.8.1	Évaluation des conséquences mécaniques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage.....	479
11.8.2	Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage.....	483
11.8.3	Conclusion	483
11.9	Synthèse de l'analyse	484
12	Synthèse	485
12.1	Des options techniques simples et robustes	486
12.2	La logique de la réversibilité prise en compte dans l'architecture.....	487
12.3	La sûreté dans l'architecture	488

12.4 Perspectives	489
Références bibliographiques	491

Tables des illustrations

Figures

Figure 1.1.1	Structure générale du dossier 2005 Argile.....	23
Figure 1.3.1	La démarche d'étude itérative.....	25
Figure 2.2.1	Fonctions de sûreté au cours du temps.....	35
Figure 2.3.1	Carte géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne	42
Figure 2.3.2	Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute Marne.....	44
Figure 2.3.3	Coupe géologique sur le site du laboratoire de recherche souterrain.....	45
Figure 2.3.4	Entrée du tunnel de Chamoise (à gauche tube en construction, au centre galerie de reconnaissance, à droite tube en exploitation).....	48
Figure 2.3.5	Vue de la galerie à -445m du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	49
Figure 2.4.1	Vue d'une architecture de stockage en cours d'exploitation.....	53
Figure 2.4.2	Positionnement du stockage dans la couche. Les profondeur et épaisseur de la formation argileuse correspondent, à titre illustratif, à l'emplacement du laboratoire de recherche souterrain.	54
Figure 2.4.3	Principe d'un ensemble d'alvéoles en cul-de-sac	56
Figure 2.4.4	Alvéole de stockage de déchets B en exploitation.....	59
Figure 2.4.5	Alvéole de stockage de déchets B scellée.....	60
Figure 2.4.6	Alvéole de stockage de déchets C vitrifiés	61
Figure 2.4.7	Alvéole de stockage de déchets C scellée.....	61
Figure 2.4.8	Alvéole de stockage de combustible usé (UOX ou MOX) en cours d'exploitation.....	63
Figure 2.4.9	Alvéole de stockage de combustible usé scellée.....	64
Figure 2.4.10	Organisation de la zone de stockage B	65
Figure 2.4.11	Modules de stockage de déchets C (ou de combustibles usés)	66
Figure 2.5.1	Synoptique d'exploitation et de fermeture.....	69
Figure 3.2.1	Assemblage combustible REP avec sa grappe.....	75
Figure 3.2.2	Conteneur Standard de Déchets Compactés (CSD-C).....	76
Figure 3.2.3	Fûts inox STE3/STE2 et STEL.....	77
Figure 3.2.4	Fût inox utilisé pour le reconditionnement des fûts primaires en acier non allié.....	78
Figure 3.2.5	Conteneur en acier non allié utilisé pour le reconditionnement des conteneurs béton 1 000 litres	79
Figure 3.2.6	Conteneur béton fibres cylindrique (CBF-C'2)	79
Figure 3.2.7	Conteneur en acier non allié utilisé pour le reconditionnement des conteneurs béton 1 800 litres	80
Figure 3.2.8	Conteneur béton de 500 litres	81
Figure 3.2.9	Fût inox de type EIP	82
Figure 3.2.10	Conteneur inox de 500 litres.....	82
Figure 3.2.11	Conteneur en acier non allié de 870 litres.....	83

Figure 3.2.12	Evolution de la puissance thermique résiduelle des colis primaires de déchets de structure de combustibles REP UOX, URE et MOX.....	85
Figure 3.2.13	Fût en inox de 1 800 litres contenant des déchets de structure cimentés.....	85
Figure 3.2.14	Blocs sources.....	89
Figure 3.2.15	Puissances thermiques des colis de déchets vitrifiés.....	90
Figure 3.2.16	Conteneurs PIVER.....	91
Figure 3.2.17	Conteneur Standard de Déchets Vitrifiés (CSD-V).....	92
Figure 3.2.18	Conteneurs de déchets vitrifiés AVM.....	92
Figure 3.2.19	Assemblage combustible REP.....	94
Figure 3.2.20	Evolution de la puissance thermique résiduelle des assemblages combustibles UOX et MOX.....	95
Figure 4.1.1	Options envisagées pour le colis de stockage de déchets B.....	110
Figure 4.1.2	Conteneur de stockage standard (illustration pour colis type B2).....	113
Figure 4.1.3	Conteneur de stockage à capacité de rétention renforcée (illustration pour colis type B5).....	114
Figure 4.1.4	Conteneurs de stockage étudiés par RWMC et Nagra.....	115
Figure 4.1.5	Colis de stockage standard (illustration pour colis types B2.1).....	117
Figure 4.1.6	Variante de conteneur à capacité de rétention renforcée (illustration pour colis type B5.2).....	119
Figure 4.1.7	Moule du corps pour conteneur standard (B2).....	125
Figure 4.1.8	Mise en place des noyaux dans le moule du colis standard B2 avant coulage.....	126
Figure 4.1.9	Démonstrateur de conteneur standard.....	127
Figure 4.1.10	Mise en place des noyaux dans le moule du colis standard B5 avant coulage.....	128
Figure 4.1.11	Démonstrateur de conteneur à capacité de rétention renforcée.....	128
Figure 4.2.1	Principe du surconteneur de déchets C.....	133
Figure 4.2.2	Détails du couvercle du colis de stockage (C02, C1 à C4).....	135
Figure 4.2.3	Implantation des patins.....	135
Figure 4.2.4	Evolution avec le temps, de la température des conteneurs de déchets vitrifiés.....	136
Figure 4.2.5	Principe de mise en alvéole du colis de stockage C.....	139
Figure 4.2.6	Lingot - Perçage – Etirage.....	140
Figure 4.2.7	Opération d'étirage dans une filière à l'aide d'un mandrin et d'une presse horizontale.....	141
Figure 4.2.8	Patins en céramique.....	141
Figure 4.2.9	Banc d'essais des patins.....	142
Figure 4.2.10	Patin en charge.....	142
Figure 4.2.11	Enceinte de soudage sous vide.....	143
Figure 4.2.12	Schéma du procédé de soudage par faisceau d'électrons.....	143
Figure 4.3.1	Colis de stockage de grand diamètre, 4 assemblages UOX ou URE.....	146
Figure 4.3.2	Colis de stockage de petit diamètre, 1 assemblage (UOX ou MOX).....	147
Figure 4.3.3	Logements carrés pour quatre combustibles usés nus.....	148

Figure 4.3.4	Logements cylindriques pour quatre combustibles usés en étuis individuels.....	148
Figure 4.3.5	Détail du conteneur et de son couvercle (conteneur avec étui).....	149
Figure 4.3.6	Logement pour assemblage en étui.....	150
Figure 4.3.7	Logement pour assemblage nu.....	150
Figure 4.3.8	Evolution avec le temps de la température des colis de combustibles usés.....	151
Figure 4.3.9	Mise en alvéole d'un colis de grand diamètre par coussin d'air	153
Figure 4.3.10	Les deux versions de conteneur de grand diamètre à logements cylindriques et carrés	154
Figure 4.3.11	Etapas de la fabrication de la virole en acier non allié.....	154
Figure 4.3.12	Préparation pour la coulée de l'insert	155
Figure 4.3.13	Coulée de l'insert	156
Figure 4.3.14	Contrôles dimensionnels.....	156
Figure 5.1.1	Tunnel avec tubes guides horizontaux.....	165
Figure 5.1.2	Cavité avec tubes guides verticaux	165
Figure 5.1.3	Tunnel pour des colis de stockage parallélépipédiques (manutention horizontale).....	165
Figure 5.1.4	Tunnel pour des colis de stockage parallélépipédiques (manutention verticale)	165
Figure 5.1.5	Alvéole de stockage de déchets B en configuration d'exploitation	166
Figure 5.1.6	Alvéole de stockage de déchets B scellée.....	167
Figure 5.1.7	Schéma du concept retenu par la Nagra (Suisse).....	170
Figure 5.1.8	Schéma du concept retenu par l'ONDRAF (Belgique).....	170
Figure 5.1.9	Schéma du concept retenu par JNC (Japon) en site sédimentaire.....	171
Figure 5.1.10	Schéma du concept de stockage retenu par DBE (Allemagne) au site de Konrad	171
Figure 5.1.11	Alvéole B en exploitation	173
Figure 5.1.12	Section courante d'une alvéole B.....	174
Figure 5.1.13	Anneau résistant et béton de remplissage	175
Figure 5.1.14	Coupe longitudinale et section du fond d'alvéole.....	175
Figure 5.1.15	Disposition des colis dans l'alvéole	176
Figure 5.1.16	Sas d'accès aux alvéoles B	177
Figure 5.1.17	Coupe de l'alvéole B et de la galerie d'accès après scellement.....	177
Figure 5.1.18	Température dans une alvéole de colis de type B5.2 stockés à 10 ans, sans prise en compte de la ventilation.....	178
Figure 5.1.19	Evolution du chargement du revêtement en fonction du temps.....	181
Figure 5.1.20	Ventilation de l'alvéole B en attente de scellement.....	183
Figure 5.1.21	Sections d'alvéoles.....	184
Figure 5.1.22	Exemples de machine à attaque ponctuelle et de jumbo de boulonnage	185
Figure 5.1.23	Creusement et soutènement d'une alvéole B en deux phases	187
Figure 5.1.24	Coffrage mobile pour tunnel.....	188
Figure 5.1.25	Schéma de principe de la fermeture de l'alvéole	189
Figure 5.1.26	Ecran de radioprotection (vue en plan)	190

Figure 5.2.1	Concepts d'alvéole pour les déchets C (puits ou tunnels, avec ou sans barrière ouvragée argileuse).....	195
Figure 5.2.2	Alvéole de stockage de déchets C : principaux composants et fonctions associées (en haut, alvéole en exploitation, en bas, alvéole scellée).....	197
Figure 5.2.3	Concept de l'ONDRAF pour le stockage des colis C, coupe transversale d'après SAFIR 2	200
Figure 5.2.4	Concept de l'ONDRAF pour le stockage des colis C, architecture générale d'après SAFIR 2	200
Figure 5.2.5	Concepts JNC (Japon) pour le stockage des colis C, d'après le rapport H12	201
Figure 5.2.6	Concept Nagra (Suisse) pour le stockage des colis C	201
Figure 5.2.7	Coupe longitudinale générale de l'alvéole C	202
Figure 5.2.8	Coupe longitudinale détaillée de l'alvéole C (proportions distordues).....	203
Figure 5.2.9	Section transversale de l'alvéole pour colis types C1 à C4	203
Figure 5.2.10	Principe de la modélisation « gigogne » retenu	207
Figure 5.2.11	Isothermes de température autour d'une alvéole C1, au moment du pic thermique	207
Figure 5.2.12	Influence de la durée d'entreposage sur le volume excavé par colis C1 (volume normalisé par rapport au volume pour une durée d'entreposage de 60 ans).....	209
Figure 5.2.13	Paramètres géométriques du dimensionnement thermique.....	210
Figure 5.2.14	Coupes longitudinales d'alvéoles C	211
Figure 5.2.15	Température en paroi d'alvéole pour les déchets C (point le plus chaud de l'argilite)	212
Figure 5.2.16	Accostage de la hotte de transport des déchets C en face de l'alvéole	217
Figure 5.2.17	Agencement général d'une unité d'exploitation d'un module de déchets C.....	218
Figure 5.2.18	Ventilation d'une unité C en exploitation	219
Figure 5.2.19	Séquence de creusement d'une alvéole C	222
Figure 5.2.20	Vue de l'outil de coupe pour la réalisation des alvéoles C	223
Figure 5.2.21	Robot soudeur pour souder à l'intérieur du chemisage (photo Air Liquide)	223
Figure 5.2.22	Tête de micro tunnelier (photos CREATIV ALLIANCE / matériel ROBBINS).....	224
Figure 5.2.23	Principe de conception des bouchons d'alvéoles C	226
Figure 5.2.24	Bouchon métallique de l'alvéole C.....	227
Figure 5.2.25	Principe de l'évolution de la pression de gonflement dans le bouchon d'argile gonflante	228
Figure 5.2.26	Equilibre entre poussée de gonflement du bouchon d'argile et réaction du remblai	229
Figure 5.2.27	Principe du démontage du chemisage et de la mise en place simultanée du bouchon d'argile gonflante (alvéole C)	231
Figure 5.3.1	Concept de « galerie de stockage »	234
Figure 5.3.2	Concept de « super-conteneur en galerie »	234
Figure 5.3.3	Concepts puits et tunnels courts pour les combustibles usés	234
Figure 5.3.4	Alvéole de combustible usé : principaux composants	236

Figure 5.3.5	Concept ONDRAF pour le stockage des combustibles usés, coupe transversale d'après SAFIR 2	238
Figure 5.3.6	Concept Nagra (Suisse) pour le stockage des colis de combustibles usés	239
Figure 5.3.7	Concepts suédois et finlandais avec alvéoles verticales (KBS-3V).....	239
Figure 5.3.8	Concept horizontal KBS3-H avec super-conteneur (SKB, Suède) : en haut, le super-conteneur; en bas, les alvéoles horizontales.....	240
Figure 5.3.9	Concept de stockage du Projet Yucca Mountain (Etats-Unis).....	241
Figure 5.3.10	Coupe longitudinale de l'alvéole CU1	242
Figure 5.3.11	Coupes transversales des alvéoles de combustibles usés CU1	243
Figure 5.3.12	Equipement intérieur du chemisage CU1	244
Figure 5.3.13	Galerie d'accès pour combustibles usés de type CU1 ou CU2	245
Figure 5.3.14	Coupe longitudinale des alvéoles CU1 et CU2.....	248
Figure 5.3.15	Température en paroi de barrière ouvragée argileuse pour les combustibles usés.....	249
Figure 5.3.16	Roue de coupe (molettes pivotées) en cours de retrait dans le revêtement.....	250
Figure 5.3.17	Bâti de poussée dans la galerie d'accès (cas pénalisant d'une galerie d'accès sans chambre d'accostage).....	250
Figure 5.3.18	Mise en place des anneaux de barrière ouvragée par coussin d'air	252
Figure 5.3.19	Principe du démontage du chemisage et de la mise en place simultanée du bouchon d'argile gonflante (alvéoles CU)	253
Figure 5.3.20	Agencement général d'une unité d'exploitation d'un module de colis CU1	254
Figure 6.2.1	Organisation générale du stockage	262
Figure 6.2.2	Organisation de la zone de stockage B	265
Figure 6.2.3	Organisation d'une zone de stockage C (ou CU).....	266
Figure 6.2.4	Vue perspective du stockage souterrain du WIPP	267
Figure 6.3.1	Distance entre ouvrages, effet de « bande ferme »	268
Figure 6.3.2	Evolution des températures dans la zone de stockage de déchets C, dans un plan horizontal (Scénario S1a, mise en stockage des déchets après 60 à 70 ans d'entreposage)	269
Figure 6.3.3	Evolution des températures autour des modules de stockage de déchets C, dans un plan vertical	270
Figure 6.3.4	Elévation de la température dans une alvéole de déchets type B2.1 en fonction du temps.....	271
Figure 6.3.5	Arborescence d'éléments borgnes	273
Figure 6.3.6	Disposition des puits et limitation des écoulements	274
Figure 6.4.1	Séparation des circuits d'exploitation et de travaux	275
Figure 6.4.2	Etapas de la construction et de l'exploitation d'une zone de stockage de déchets C.....	276
Figure 6.4.3	Synoptique du transport des déblais.....	277
Figure 6.4.4	Principe de fonctionnement de la ventilation avec retour d'air en gaine.....	279
Figure 6.4.5	Principe de fonctionnement d'une gaine de désenfumage.....	279
Figure 6.4.6	Principe de ventilation	280
Figure 6.4.7	Organisation de la ventilation (Exemple du scénario S1a).....	281

Figure 6.4.8	Ventilation de la zone B.....	282
Figure 6.4.9	Ventilation de la zone C.....	283
Figure 6.5.1	Infrastructure principale zone B.....	285
Figure 6.5.2	Infrastructure secondaire zone C.....	285
Figure 6.6.1	Principe d'architecture pour le scénario S1a.....	287
Figure 6.6.2	Répartition des volumes excavés dans le scénario S1a.....	288
Figure 6.6.3	Adaptation possible des architectures aux différents scénarios d'étude	289
Figure 6.6.4	Adaptation de l'architecture aux combustibles usés CU3.....	290
Figure 6.6.5	Sensibilité de l'emprise d'un stockage à la durée d'entreposage préalable des colis fortement exothermiques - scénario S1a	291
Figure 6.6.6	Sensibilité de l'emprise d'un stockage à la durée d'entreposage préalable des colis fortement exothermiques - scénario S2.....	292
Figure 7.3.1	Section longitudinale du puits de transfert des colis.....	298
Figure 7.3.2	Section du puits de transfert des colis.....	299
Figure 7.3.3	Section du puits de personnel.....	300
Figure 7.3.4	Section du puits de travaux	301
Figure 7.3.5	Descenderie de travaux	302
Figure 7.3.6	Descenderie pour le transfert des colis	303
Figure 7.4.1	Zone des puits	304
Figure 7.4.2	Zone des puits de Gorleben.....	305
Figure 7.4.3	Sections standard de galerie de diamètre utile moyen 5.7 m	306
Figure 7.4.4	Section de galerie envisageable en zone de scellement	306
Figure 7.4.5	Galeries de transfert des colis C et B	307
Figure 7.4.6	Galerie de travaux avec piste	308
Figure 7.5.1	Plateforme de fonçage de puits (mine de sel de Konradsberg – Heilbronn – Allemagne).....	310
Figure 7.7.1	Schéma de scellement de galerie (avec coupures hydraulique de la zone fracturée).....	314
Figure 7.7.2	Equilibre entre la poussée de gonflement du noyau et la réaction du remblai (déplacement initial de 1 m avant de solliciter le remblai et raideur du remblai de 1 m/MPa)	316
Figure 7.7.3	Scellement expérimental constitué de blocs de bentonite – essai TSX mené au Canada (à l'échelle industrielle, ces blocs seraient de dimensions supérieures).....	317
Figure 7.7.4	Scie construite pour l'essai KEY au laboratoire de Meuse/Haute Marne (à gauche) et essai EZ-A au laboratoire du Mont Terri (à droite).....	319
Figure 7.7.5	Schéma de scellement d'alvéole de stockage de déchets B	320
Figure 7.7.6	Schéma de scellement de puits – vue d'ensemble	321
Figure 7.7.7	Appareillage de briques d'argiles gonflantes pour le scellement d'un puits.....	322
Figure 7.7.8	Massif de confinement d'un scellement de puits.....	323
Figure 8.1.1	Vue d'ensemble des installations de surface.....	327
Figure 8.2.1	Bâtiment pour déchets B et C	328
Figure 8.2.2	Bâtiment pour combustibles usés.....	329

Figure 8.4.1	Principe d'exploitation d'une verse par tranche.....	330
Figure 9.1.1	Synoptique des opérations de réception des colis primaires.....	335
Figure 9.1.2	Entreposage sur lorry des emballages de transport (doc. Cogema)	335
Figure 9.1.3	Accostage de l'emballage sous une cellule de déchargement (doc. Cogema).....	335
Figure 9.1.4	Cellule de déchargement et d'entreposage de colis primaires (doc. Cogema)	335
Figure 9.1.5	Cycle de préparation des colis de stockage de déchets B	336
Figure 9.1.6	Cycle de préparation des colis de stockage de déchets C	338
Figure 9.1.7	Cycle de préparation des colis de stockage de combustibles usés	339
Figure 9.1.8	Poste de soudage du couvercle d'un colis de combustibles usés.....	340
Figure 9.2.1	Synoptique général du transfert des colis de stockage jusqu'à l'alvéole	341
Figure 9.2.2	Hottes de transfert des colis B, C et combustibles usés	342
Figure 9.2.3	Hotte de transfert de colis de stockage (photo issue du WIPP)	342
Figure 9.2.4	Principe du système à friction KOEPE	344
Figure 9.2.5	Poulie Koepe du puits de descente des colis du WIPP (USA).....	344
Figure 9.2.6	Principe de l'encagement et décagement de la hotte	345
Figure 9.2.7	Véhicule de transfert d'une hotte de déchets B.....	346
Figure 9.2.8	Véhicule de transfert utilisé sur le site de la Hague (doc Cogema)	347
Figure 9.2.9	Accostage de la hotte C par la navette sur la tête d'alvéole.....	347
Figure 9.3.1	Types d'équipement de manutention envisagés pour les colis B.....	349
Figure 9.3.2	Chariot stockeur sans contrepoids.....	350
Figure 9.3.3	Chariot de manutention (photo COVRA)	351
Figure 9.3.4	Equipements de l'alvéole	352
Figure 9.3.5	Synoptique de mise en alvéole des colis B	353
Figure 9.3.6	Rotation et translation du stockeur dans le sas.....	354
Figure 9.3.7	Transfert du colis en position basse	354
Figure 9.3.8	Chariot élévateur à contrepoids (photo DBE).....	355
Figure 9.3.9	Illustration des principes de manutention envisagés	356
Figure 9.3.10	Robot pousseur pour colis C	357
Figure 9.3.11	Illustration du principe de fonctionnement du robot pousseur.....	358
Figure 9.3.12	Hotte accostée sur la tête d'alvéole.....	359
Figure 9.3.13	Extraction de la hotte et mise en place du colis dans l'alvéole	359
Figure 9.3.14	Hotte équipée d'un pousseur hydraulique pour la mise en place de déchets de type RH dans des alvéoles horizontales de l'installation du WIPP	360
Figure 9.3.15	Les principes de manutention envisagés pour les combustibles usés	361
Figure 9.3.16	Aéroporteur	362
Figure 9.3.17	Principe de fonctionnement des coussins d'air soufflant vers le haut	363
Figure 9.3.18	Transfert du colis dans l'alvéole	364
Figure 9.3.19	Prototype de berceau à coussins d'air	365
Figure 9.3.20	Test de translation par coussin d'air d'une charge simulant la forme et le poids d'un colis de stockage de combustible usé de type CU1.....	365
Figure 9.3.21	Schéma du principe adopté par SKB	365

Figure 10.1.1	Les étapes clés d'exploitation et de fermeture d'un stockage.....	371
Figure 10.2.1	Accessibilité des têtes d'alvéoles B.....	372
Figure 10.2.2	Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets B après mise en place des colis de stockage.....	374
Figure 10.2.3	Accessibilité à l'entrée des galeries d'accès scellées.....	375
Figure 10.2.4	Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets B après fermeture.....	376
Figure 10.2.5	Accessibilité aux têtes d'alvéoles C.....	378
Figure 10.2.6	Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets C après mise en place des colis.....	380
Figure 10.2.7	Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de combustibles usés après mise en place des colis.....	381
Figure 10.2.8	Accessibilité aux têtes d'alvéoles C après mise en place du scellement.....	381
Figure 10.2.9	Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets C sans argile gonflante après scellement.....	383
Figure 10.2.10	Représentation schématique des principaux phénomènes autour d'une galerie de liaison suivant son orientation à l'échelle d'un siècle.....	385
Figure 10.3.1	Illustration d'un extensomètre à corde vibrante, rattaché à une armature et intégré dans l'ouvrage en béton.....	397
Figure 10.3.2	Table de mesure d'un pendule vertical.....	398
Figure 10.3.3	Extensomètre inductif de forage.....	398
Figure 10.3.4	Cellule de pression interstitielle à corde vibrante.....	399
Figure 10.3.5	Thermomètre à corde vibrante.....	399
Figure 10.3.6	Fibre optique pour mesure distribuée de température.....	400
Figure 10.3.7	Transmission sans fil vers la surface au site du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne.....	401
Figure 10.3.8	Dispositif expérimental de transmission sans fil dans le laboratoire souterrain de Äspö.....	401
Figure 10.3.9	Exemple de l'auscultation à l'échelle d'un stockage, à un instant du processus de stockage.....	403
Figure 10.3.10	Dispositif d'observation d'une alvéole B témoin.....	405
Figure 10.3.11	Constitution d'une section instrumentée d'un module B témoin.....	405
Figure 10.3.12	Unité d'auscultation dans une alvéole B témoin.....	406
Figure 10.3.13	Dispositifs d'auscultation de la partie aval d'un scellement.....	409
Figure 10.3.14	Moyens d'auscultation envisageables pour une alvéole C témoin.....	410
Figure 10.3.15	Exemple illustrant l'auscultation en surface de chemisage d'alvéole C.....	411
Figure 10.3.16	Auscultation d'une alvéole C sur le chemisage et en forages.....	412
Figure 10.3.17	Dispositif à l'étude d'une transmission sans fil à travers le bouchon d'alvéole C.....	414
Figure 10.3.18	Section instrumentée d'une alvéole de combustibles usés.....	415
Figure 10.3.19	Illustration des possibilités de répartition des moyens d'auscultation dans une section de galerie.....	416
Figure 10.3.20	Répartition des sections instrumentées et des pendules dans un puits.....	418
Figure 10.3.21	Section instrumentée d'un puits.....	419

Figure 10.3.22	Moyens mis en œuvre dans une unité d'auscultation en paroi de puits	419
Figure 10.4.1	Les jeux fonctionnels - Coupe d'une alvéole de stockage de colis B	422
Figure 10.4.2	Alvéole remplie de colis B en fin d'exploitation.	423
Figure 10.4.3	Alvéoles remplies de colis B après scellement	424
Figure 10.4.4	Contrôle de l'atmosphère d'une alvéole B par forage	424
Figure 10.4.5	Vue de dessus de la galerie d'aération avec antennes.....	425
Figure 10.4.6	Réalisation de la galerie de retour de ventilation.	425
Figure 10.4.7	Processus de déconstruction du scellement	426
Figure 10.4.8	Alvéole B reconstruite	426
Figure 10.4.9	Jeu fonctionnel entre un colis et le chemisage d'une alvéole C.....	428
Figure 10.4.10	Alvéole C en fin d'exploitation.....	429
Figure 10.4.11	Exemple de robot tracteur utilisé pour la reprise des colis	430
Figure 10.4.12	Principes de préhension et de retrait des colis stockés.....	431
Figure 10.4.13	Alvéole C scellée	431
Figure 10.4.14	Forage du scellement d'alvéole C	432
Figure 10.4.15	Reconstruction de la tête d'alvéole C	433
Figure 10.4.16	Alvéole C après reconstruction.....	433
Figure 11.2.1	Caractérisation d'un risque	445
Figure 11.2.2	Test d'écrasement d'un matériau « nid d'abeille » (vitesse d'impact de 200 km/h).....	451
Figure 11.2.3	Schéma des dispositifs de réduction de risque envisagés vis-à-vis du transfert de colis en puits	452
Figure 11.4.1	Puissance thermique totale standardisée pour un feu 30 MW	460
Figure 11.4.2	Circulation des fumées et évacuation dans le cas d'un incendie dans une unité C (ou CU) en exploitation.....	461
Figure 11.4.3	Cas d'incendie avec fumées stratifiées	461
Figure 11.4.4	Cas d'un incendie en galerie de liaison : évacuation de part et d'autre de l'incendie	462
Figure 11.4.5	Incendie dans une galerie en cul de sac : évacuation du personnel par une recoupe vers la galerie contiguë ou mise en sécurité dans un refuge mobile.....	463
Figure 11.4.6	Evolution spatio-temporelle de la température de l'air (°C) dans le cas d'un incendie dans une galerie d'accès aux alvéoles C en exploitation nucléaire – Représentation du déplacement des personnes situées en aval aérée de l'incendie	464
Figure 11.5.1	Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1) dans le cas d'un incendie de l'engin de transfert.....	469
Figure 11.6.1	Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1) dans le cas d'un incendie en alvéole de stockage	473
Figure 11.7.1	Représentation 3D de la partie basse du puits avec le système amortisseur de chute	474
Figure 11.7.2	Bilan énergétique d'une chute en puits d'une cage transportant une hotte avec déchets C.....	476
Figure 11.8.1	Scénario de chute d'un colis de stockage sur le sol de l'alvéole.....	480

Figure 11.8.2	Déformations plastiques du colis primaire B2.1 (chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin).....	482
Figure 11.8.3	Déformations plastiques du colis primaire B5.2 (chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin).....	482
Tableaux		
Tableau 2.5.1	Mise en stockage des colis de déchets et composants d'un stockage.....	68
Tableau 2.5.2	Fonctions de sûreté à long terme et composants d'un stockage	70
Tableau 3.2.1	Récapitulatif des principales caractéristiques des sous-ensembles de colis de déchets technologiques cimentés ou compactés.....	83
Tableau 3.2.2	Récapitulatif des principales caractéristiques des sous-ensembles de colis de déchets de structure compactés	87
Tableau 3.2.3	Récapitulatif des caractéristiques des déchets de structure et technologiques mis en fûts.....	88
Tableau 3.2.4	Masse des assemblages combustibles REP (par matériau et masse totale).....	95
Tableau 3.3.1	Liste des colis types du modèle d'inventaire	99
Tableau 3.3.2	Données quantitatives globales, en nombres et volumes de colis, pour les colis types de déchets B	100
Tableau 3.3.3	Détail des nombres et volumes des colis types B2, B3, B5, B6, B7 et B8	101
Tableau 3.3.4	Données quantitatives globales, en nombres et volumes de colis, pour les colis types de déchets C	102
Tableau 3.3.5	Etat à fin 2003 des volumes de déchets B et C produits, conditionnés ou non, et à produire (cas du scénario S1a)	102
Tableau 3.3.6	Nombre d'assemblages combustibles REP	103
Tableau 5.1.1	Fonctions et principaux composants de l'alvéole B (ou module)	169
Tableau 5.2.1	Fonctions et principaux composants de l'alvéole et du module de déchets C	199
Tableau 5.2.2	Emprise pour stocker un colis C	211
Tableau 5.2.3	Extension des zones fracturée et microfissurée à court terme (profondeur 500 m).....	215
Tableau 5.3.1	fonctions et principaux composants de l'alvéole de combustibles usés.....	237
Tableau 5.3.2	Emprise pour stocker les combustibles usés	248
Tableau 6.1.1	Quantités de colis considérées et nombre d'alvéoles	260
Tableau 6.1.2	Flux annuels de colis.....	261
Tableau 9.2.1	Références de puits équipés du système « Poulie Koepe ».....	343
Tableau 11.1.1	Débit d'équivalent de dose au contact des colis primaires [3].....	441
Tableau 11.1.2	Estimation de la dose annuelle reçue par les opérateurs (mSv/an/personne) affectés aux installations nucléaires du stockage	443
Tableau 11.2.1	Bilan relatif aux principaux risques conventionnels associés au processus de stockage.....	447
Tableau 11.2.2	Bilan relatif aux risques radiologiques liés au stockage	453
Tableau 11.3.1	Taux d'émission de gaz explosifs libérés par certains colis de déchets B.....	456
Tableau 11.4.1	Rayonnement thermique reçu pendant l'évacuation dans le cas d'un incendie (30 MW) avec fumées stratifiées en galerie de liaison.....	465
Tableau 11.5.1	Caractéristiques principales des colis et hottes de transfert	467

Tableau 11.5.2	Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire de boues bitumées (B2) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie	468
Tableau 11.5.3	Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire C obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie	469
Tableau 11.5.4	Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et des combustibles usés (CU1) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie.....	470
Tableau 11.6.1	Températures estimées au niveau du colis de stockage et des colis primaires de boues bitumées obtenues par simulation numérique de conditions d'incendie	472
Tableau 11.7.1	Données principales relatives aux cas de chute en puits étudiés	475
Tableau 11.7.2	Estimations des déformations subies par les colis à l'issue de la chute sur l'amortisseur	477
Tableau 11.8.1	Caractéristiques principales des colis de stockage étudiés [41].....	480
Tableau 11.8.2	Estimation des déformations des colis primaires à la suite d'une chute du colis de stockage	481

1

Démarche d'étude

1.1	L'objet du Tome dans le dossier Argile 2005	22
1.2	Les principales étapes de l'étude de la conception.....	23
1.3	Une démarche itérative	25
1.4	La structuration du tome	25

1.1 L'objet du Tome dans le dossier Argile 2005

La loi du 30 décembre 1991 [1] a confié à l'Andra la mission d'évaluer la faisabilité d'un stockage de déchets de haute activité et à vie longue (HAVL) en formation géologique profonde. Ce tome du dossier Argile 2005 rend compte des résultats de l'étude, du point de vue de l'architecture et de la gestion d'un tel stockage. Il s'appuie sur les caractéristiques de la formation argileuse étudiée au moyen du laboratoire de recherche souterrain, situé dans les départements de la Meuse et de la Haute-Marne.

L'étude de faisabilité s'est attachée à évaluer les conditions dans lesquelles un stockage pourrait être construit, exploité et géré de manière réversible, fermé, surveillé puis pourrait ensuite évoluer sans aucune intervention humaine. Elle couvre l'ensemble de l'inventaire des déchets radioactifs français de haute activité et à vie longue, existants ou à produire dans un avenir à court et moyen termes. Elle vise à ce qu'à aucun moment la sécurité des personnels et du public, ainsi que la protection de l'environnement, ne soient compromises.

Pour évaluer cette faisabilité, l'Andra a retenu de décrire une architecture de stockage possible au regard des attentes, et réaliste d'un point de vue industriel. Cette conception est fondée sur les connaissances et la technologie disponibles.

L'architecture étudiée ne fige en aucune manière la définition d'un éventuel stockage. Les options techniques présentées dans le présent document, choisies aussi simples et robustes que possible, montrent que des solutions existent. Ces options ne sauraient être considérées comme optimisées, tant du point de vue technico économique que vis-à-vis de la sûreté. Elles sont donc susceptibles d'évoluer si une suite était donnée au-delà de 2006.

Cette architecture a également constitué la base sur laquelle a été analysée la sûreté du stockage et notamment son comportement et son évolution aux différentes échelles de temps. L'évolution phénoménologique d'un stockage et son évaluation de sûreté font l'objet de deux autres tomes du dossier Argile 2005 (Figure 1.1.1). Les trois tomes s'appuient sur des référentiels de connaissances et sur un ensemble de documents techniques thématiques. Les référentiels de connaissance concernent le site de Meuse/Haute-Marne, les colis de déchets (description et modèle d'inventaire), les matériaux constitutifs du stockage, ainsi que le comportement des colis de déchets (modèle de relâchement) et des radionucléides. Les documents techniques thématiques qui concernent plus particulièrement le présent tome portent sur la spécification et la conception des principaux composants du stockage (colis et alvéoles de stockage) ainsi que sur la modélisation conceptuelle des phénomènes à prendre en compte dans la conception et la réversibilité du stockage (par exemple la charge thermique).

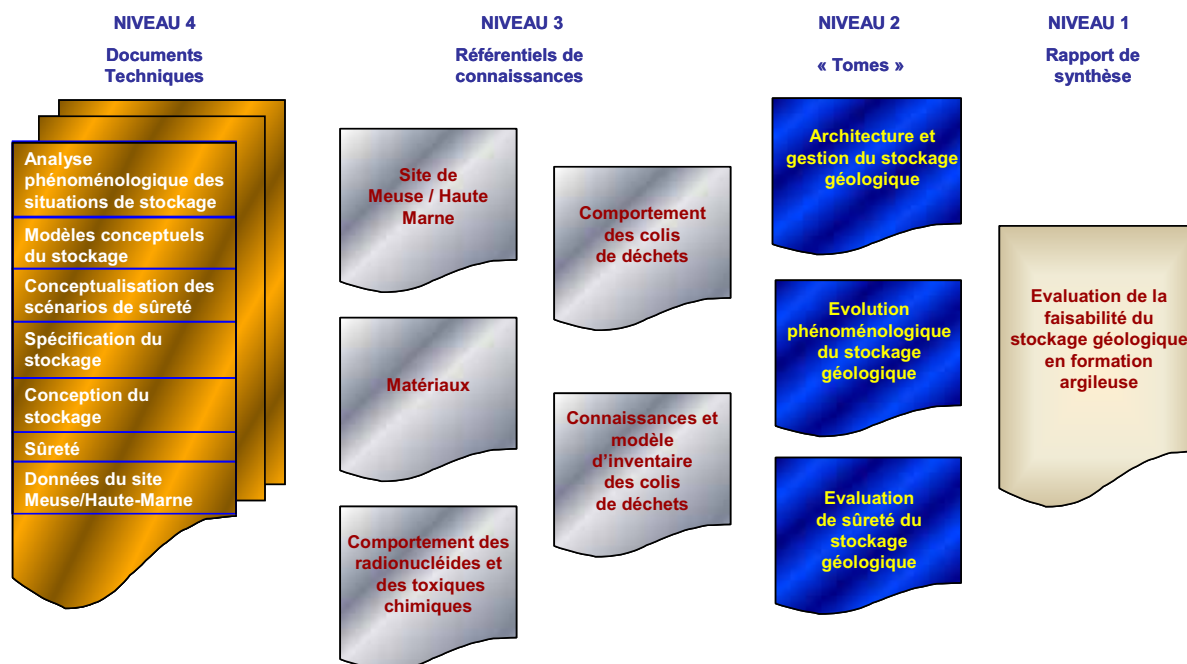


Figure 1.1.1 Structure générale du dossier 2005 Argile

Il convient enfin de noter que le but de la démarche n'est pas de positionner le stockage sur un site précis. La question de la localisation d'un stockage apparaît aujourd'hui prématurée. Aussi l'Andra s'est assuré de la transposabilité des résultats, obtenus sur le site du laboratoire, à une zone plus large. Cette transposabilité est le gage que ces résultats ne sont pas dépendants des spécificités d'une localisation particulière au sein d'une zone donnée.

1.2 Les principales étapes de l'étude de la conception

La démarche de l'Andra relative à l'étude du stockage géologique est itérative. Au fur et à mesure du déroulement des recherches depuis la loi du 30 décembre 1991, la connaissance des colis, celle du site géologique étudié, celle des principaux phénomènes à prendre en compte dans la conception d'un stockage, ont progressé simultanément.

La période 1994 – 1996 a été consacrée à des travaux de reconnaissance géologique effectués sur les sites désignés par la Mission de concertation menée par le député Christian Bataille. Il s'est agi de vérifier l'absence de caractère rédhibitoire de ces sites au regard des critères de la règle fondamentale de sûreté RFS.III.2.f [2]. Cette phase s'est conclue par le dépôt de dossiers de demandes d'autorisation de création de laboratoire souterrain, dont l'un portait sur le site de Meuse/Haute-Marne.

Accompagnant ces travaux, une première recherche de concepts de stockage a été effectuée. Celle-ci s'est concrétisée en 1997 par la sélection d'*options initiales de conception*. Ces options répondaient aux questions que les premières études de sûreté avaient mises en évidence, notamment en termes de comportement à long terme des colis et des barrières ouvragées.

Les études menées sur cette base ont ensuite conduit à la sélection de *concepts préliminaires*. Ceux-ci tenaient compte des différents types de déchets, des connaissances de la formation argileuse acquises par les travaux de reconnaissance depuis la surface, ainsi que des incertitudes qui subsistaient à ce stade. Les concepts préliminaires visaient à explorer une gamme d'options assez large, de manière à traiter les différentes problématiques scientifiques et techniques, relativement à leur faisabilité technologique, leur sûreté et leur réversibilité. Dans ce cadre différents types de géométries de stockage, de matériaux, de modes d'exploitation et de manutention avaient ainsi été retenus.

De 1999 à 2001, les concepts préliminaires ont fait l'objet d'une analyse de sûreté, dite « première vérification de sûreté », permettant d'une part de tester les méthodes d'analyse, d'autre part d'identifier les points importants à étudier en matière de sûreté, de connaissances à approfondir et d'éléments de conception à améliorer. En parallèle à l'analyse de sûreté après fermeture, une première évaluation des risques en exploitation a été effectuée. Les concepts préliminaires ont aussi été analysés sous l'angle de leur réversibilité. Les résultats de ces études ont été rassemblés dans un dossier d'étape produit en 2001.

Simultanément, une recherche de pistes d'améliorations techniques et économiques des concepts était menée. Des options alternatives ont notamment été introduites dans une optique d'augmentation de la capacité du stockage.

En 2002, les enseignements tirés du dossier Argile 2001 ont permis la sélection des options techniques qui fondent le présent dossier. Cette sélection a privilégié, pour chaque type de colis, un concept simple et robuste vis-à-vis de l'état des connaissances. En particulier, des options bénéficiant d'analogies industrielles ont été retenues, permettant de s'appuyer sur un retour d'expérience.

L'Andra a alors établi une spécification technique de besoin déclinant les besoins fonctionnels et les choix techniques sur les composants. Cette spécification a constitué une donnée de base pour les études d'ingénierie menées de 2002 à 2005, ainsi que pour les études de comportement et l'analyse de sûreté.

Les études d'ingénierie réalisées depuis 2002 visaient à décrire plus en détail les principaux composants d'une architecture de stockage, et à vérifier la capacité à les réaliser et à les exploiter. Ces études ont été progressivement calées sur les nouvelles données acquises sur le site de Meuse/Haute-Marne, lors de la réalisation du laboratoire souterrain.

Dans le cadre de ces études, l'Andra a fait une recherche systématique des analogues industriels dans les domaines du nucléaire, de la mine et des grands ouvrages de génie civil. Elle s'est attachée à recueillir le retour d'expérience industriel transposable au cas du stockage. Pour ce faire, elle s'est entourée de grandes ingénieries spécialisées dans les domaines précités. D'autre part, l'Andra n'a pas limité sa réflexion à la problématique française. Au travers de programmes de coopération et d'échanges techniques, les concepts de l'Andra ont été confrontés à ceux des homologues étrangers.

Enfin, à ce stade, l'aspect démonstration technologique n'a été essentiellement abordé que par la prise en compte du retour d'expérience. Il a toutefois été complété par des essais sur des points particuliers, tels que les colis de stockage ou les principes de manutention pour lesquels ce retour d'expérience ou l'expérience tirée d'essais menés à l'étranger n'apparaissent pas suffisants.

Globalement, l'évaluation de faisabilité du stockage présentée dans le présent dossier est fondée sur les résultats d'études et de travaux consacrés à l'acquisition de connaissances, et à leur synthèse sous une forme utilement exploitable (modèles). Les travaux de reconnaissance et de caractérisation menés sur le site de Meuse/Haute-Marne, depuis la surface lors de la construction du laboratoire souterrain, et in fine dans les galeries du laboratoire, ont été accompagnés de recherches scientifiques sur la géosphère, sur la biosphère et sur le comportement des roches à partir d'échantillons. Enfin, un important programme scientifique d'acquisitions de connaissances a été réalisé sur le comportement physico-chimique des matériaux constitutifs des colis et des radionucléides qu'ils contiennent, ainsi que sur celui des matériaux de construction d'un stockage.

En outre, l'architecture du stockage a fait l'objet de modélisations. Elles consistent à recenser les phénomènes intervenant dans le stockage et à décrire l'évolution des composants du stockage et du milieu géologique qui en résulte. Des modélisations ont classiquement permis de dimensionner les ouvrages. Mais leur rôle essentiel a été d'aborder le comportement du stockage sur de grandes échelles de temps (depuis l'échelle séculaire jusqu'à celle de la centaine de milliers d'années). L'approche d'un tel comportement ne peut en effet se suffire d'expériences menées sur une durée courte au regard des périodes considérées, ou du retour d'expérience.

Enfin, l'analyse de sûreté à long terme permet de vérifier la capacité du système dans son ensemble à répondre aux objectifs de protection radiologique fixés par la règle fondamentale de sûreté

n° III-2.f [2] et d'évaluer sa robustesse vis-à-vis des incertitudes associées aux grandes échelles de temps.

1.3 Une démarche itérative

L'Andra a retenu de mener ses études suivant une démarche itérative, au fur et à mesure que se précisent d'une part les connaissances, d'autre part l'architecture du stockage. Le principe en est représenté à la figure suivante.

Cela répond notamment à une recommandation de la règle fondamentale de sûreté RFS.III.2.f. en matière de sûreté à long terme. Celle-ci stipule en effet que « *les objectifs quantitatifs pour les performances de confinement des différentes barrières ne pourront être valablement fixés qu'à l'issue d'un processus itératif, intégrant l'expérience acquise au cours de l'étude de la sûreté des stockages* ».

Chaque itération se caractérise par des acquisitions de connaissances et par l'étude de concepts d'architecture en cohérence avec ces connaissances. Les connaissances disponibles permettent d'appréhender le comportement des concepts étudiés au moyen de modélisations.

Ces éléments constituent la base d'une analyse de sûreté. Cette dernière porte sur les fonctions à long terme du stockage, qui en constituent la spécificité, mais aussi sur sa sûreté opérationnelle.

Les enseignements de l'analyse de sûreté deviennent alors des données d'entrée de l'itération suivante : incertitudes de connaissances qu'il conviendrait de réduire en priorité, orientations en matière de conception.

Cette démarche assure la prise en compte de la sûreté dès les phases situées le plus en amont de la conception. Elle permet (i) d'orienter progressivement les choix vers des solutions qui offrent le plus de robustesse vis-à-vis des incertitudes de connaissances (ii) d'introduire des mesures de prévention et de protection vis-à-vis des risques identifiés.

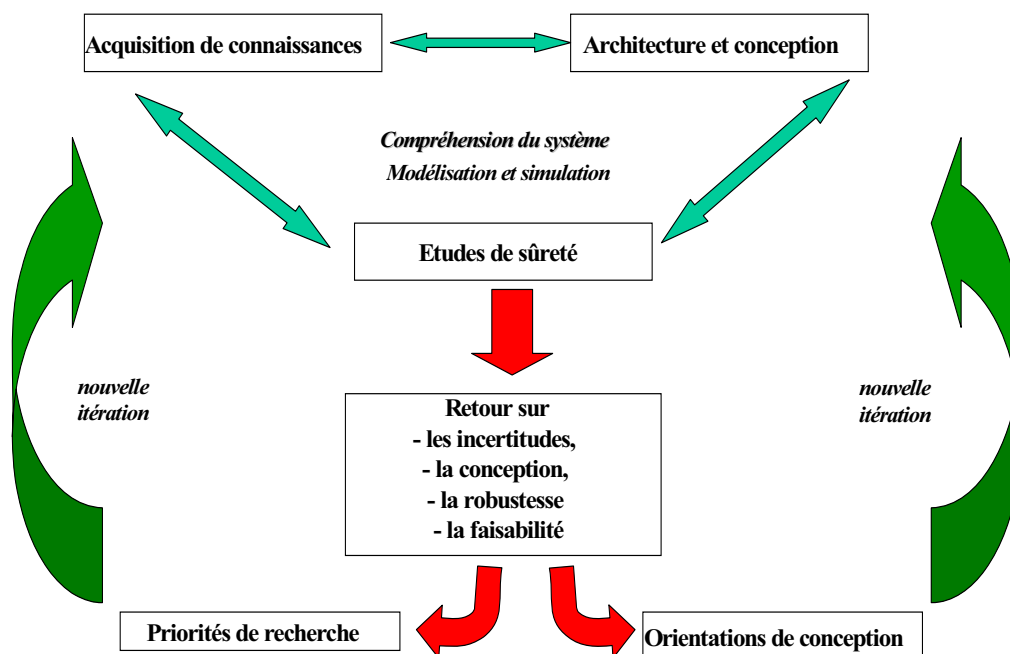


Figure 1.3.1 La démarche d'étude itérative

1.4 La structuration du tome

Les études de conception préliminaire d'un éventuel stockage, auxquelles se réfère plus particulièrement le présent document, comprennent plusieurs volets étroitement liés.

Elles commencent par l'identification des fonctions d'un stockage au regard des objectifs de sûreté, ainsi que de la demande de réversibilité. Les options techniques répondant à ces fonctions sont ensuite identifiées et étudiées. Ces éléments sont présentés de façon synthétique au chapitre 2.

Un travail systématique d'inventaire des déchets HAVL a été réalisé et synthétisé par un « modèle d'inventaire ». Les résultats de ce travail sont exposés au chapitre 3.

Parmi les options techniques essentielles, le cœur du concept de stockage réside dans la nature des colis de stockage des déchets HAVL inventoriés et dans la conception des ouvrages souterrains destinés au stockage de ces derniers. Ces deux éléments sont présentés respectivement aux chapitres 4 et 5.

Les composantes physiques complémentaires sont relatives à la logique d'agencement des ouvrages souterrains, aux ouvrages d'accès (puits et galeries de liaison) ainsi qu'aux installations de surface. Ces éléments sont présentés respectivement aux chapitres 6, 7 et 8. La présentation des ouvrages souterrains couvre notamment les dispositifs qui seraient mis en place pour fermer le stockage (remblais et scellements). La partie relative aux installations de surface est volontairement succincte, car ces dernières seraient analogues aux installations de centres nucléaires existants.

Au-delà de la description d'une installation de stockage, l'étude s'est attachée à vérifier l'existence de moyens techniques permettant l'exploitation industrielle. La description de ces moyens est présentée au chapitre 9.

La réversibilité a été prise en compte non seulement dans la conception de l'architecture présentée, mais également dans la logique d'exploitation du stockage. Les éléments qui concourent à la réversibilité du stockage sont présentés au chapitre 10. Cette composante met notamment en exergue la nécessité de la maîtrise du comportement phénoménologique du stockage et décrit les moyens d'action techniques associés.

Un autre volet, indissociable de la conception d'une architecture de stockage dans une perspective industrielle, est la sécurité et la sûreté nucléaire lors des opérations de construction et d'exploitation. Ce thème a conduit à la réalisation d'une analyse préliminaire de risques et à l'étude de situations accidentelles hypothétiques. Les résultats de cette étude sont présentés au chapitre 11. La logique de cette étude s'apparente à une démarche classique. Néanmoins, elle s'en distingue par le fait qu'elle ne s'inscrit pas dans le cadre institutionnel d'une demande de création d'installation nucléaire de base. Ainsi, elle s'est concentrée sur les problématiques spécifiques du stockage, et ne traite pas de manière exhaustive de l'ensemble des dispositions de sûreté lorsque celles-ci sont déjà bien connues dans un autre contexte.

En conclusion, le chapitre 12 synthétise les principaux enseignements de l'étude en matière de faisabilité technologique d'un stockage, intégrant la logique de réversibilité et tenant compte des objectifs de sûreté. Il esquisse quelques perspectives quant à des études complémentaires d'optimisation qui pourraient être menées au-delà de la présente étude.

2

Description générale

2.1	Les déchets à haute activité et à vie longue.....	28
2.2	Les fonctions d'un stockage réversible	31
2.3	Le contexte géologique du site de Meuse/Haute Marne – La formation du Callovo-Oxfordien	42
2.4	Principes de conception de l'architecture du stockage.....	52
2.5	Le rôle des différents composants d'un stockage.....	66

Ce chapitre donne une vue d'ensemble de l'architecture et de la gestion d'une installation de stockage réversible.

Il expose tout d'abord les principales caractéristiques des déchets à stocker et les fonctions que doit assurer le stockage au cours du temps. Ces fonctions résultent essentiellement de l'objectif de protection de l'environnement et des générations à venir vis-à-vis des risques susceptibles d'être induits par les déchets. Elles sont également fondées sur la prise en compte de la réversibilité.

Il présente ensuite le contexte géologique pour lequel la faisabilité du stockage est étudiée.

Ce chapitre fournit également une description synthétique des options techniques et des principes sur lesquels elles sont fondées en réponse aux principales fonctions du stockage. Ces options portent sur l'architecture de l'installation et sur les conteneurs de stockage des déchets.

Enfin, il fournit une récapitulation synthétique du rôle des différents composants du stockage au regard de la réalisation des fonctions attendues.

2.1 Les déchets à haute activité et à vie longue

Les déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) contiennent à la fois des radionucléides à vie courte, généralement en quantité importante (haute activité) et des radionucléides à vie longue¹ en quantité moyennement à très importante.

Leur contenu en radionucléides à vie longue renvoie plus particulièrement au risque d'ingestion entraînant une exposition de tissus vivants au rayonnement α ; la période radioactive² de certains isotopes dépasse la centaine de milliers d'années.

Une grande partie des déchets HAVL présentent aussi une haute activité de rayonnement γ , qui implique de protéger l'homme d'une radio-exposition externe.

L'activité β - γ présente dans les déchets HAVL décroît relativement rapidement dans le temps : ainsi, après quelques dizaines d'années, les combustibles nucléaires ne contiennent plus que quelques pour cent de la radioactivité qu'ils présentaient lors du déchargement du réacteur.

L'énergie générée par la radioactivité est convertie essentiellement en chaleur : le rayonnement est absorbé dans la matière même constituant le colis de déchet et, pour une plus faible part, dans la matière située à son voisinage immédiat. Lorsque la radioactivité β - γ a très fortement décliné (au bout de quelques siècles), l'énergie radioactive résiduelle, associée aux isotopes à longue période, est très faible, et la chaleur produite devient alors non significative.

La décroissance de l'activité β - γ dans le temps suggère, pour les colis les plus actifs, une période intermédiaire d'attente, entre leur production et leur stockage. Cette attente peut être réalisée dans des installations d'entreposage. Elle permet de diminuer la chaleur produite par les déchets, qui intervient sur le dimensionnement des installations de stockage et sur leur emprise dans la formation d'accueil.

2.1.1 Nature et provenance des déchets HAVL

Les déchets HAVL résultent de l'industrie électronucléaire, ainsi que d'activités de recherche et de la défense nationale. Pour mener l'étude des possibilités de stockage, l'Andra a constitué un « modèle d'inventaire » consolidant les données et hypothèses sur les déchets HAVL [3]. Il prend en compte les déchets déjà produits, et entreposés actuellement sur leurs sites de production, ainsi que des déchets futurs.

¹ Les isotopes à vie longue comprennent (i) des produits de fission ou d'activation, résultant respectivement de la division d'atomes lourds, tels que l'uranium et le plutonium, lors de réactions de fission en réacteur, et de l'absorption de neutrons par des matériaux présents dans le réacteur (métaux principalement) (ii) des actinides, composés d'uranium et d'atomes plus lourds formés, à partir d'uranium, par capture de neutrons.

² La période radioactive d'un isotope est la durée nécessaire à la désintégration (i.e. transformation spontanée en un autre élément, radioactif ou stable) de 50 % de la quantité présente de cet isotope. Un isotope est dit à vie longue lorsque sa période radioactive est strictement supérieure à 30 ans.

Les déchets de l'industrie électronucléaire proviennent essentiellement des combustibles usés déchargés des réacteurs de production d'électricité. Actuellement ces combustibles sont retraités par Cogema dans ses usines de La Hague : des résidus sont alors séparés de l'uranium et du plutonium, ce sont les produits de fission et actinides mineurs, ainsi que les structures mécaniques des assemblages de combustible (tronçons de gaines, pièces d'embouts).

Pour l'étude du stockage, on considère l'ensemble des déchets engagés par le parc électronucléaire actuel, sur la base d'une hypothèse de durée moyenne de fonctionnement des réacteurs de quarante années.

Différents scénarios de production ont été pris en compte dans l'étude. Ils ont été choisis de manière à donner accès à une large gamme de types de déchets, même hypothétiques, et permettre ainsi d'aborder les différentes problématiques pour l'étude de leur stockage. Une première famille de scénarios considère la poursuite du retraitement des combustibles usés déchargés des réacteurs. Le second type de scénario fait l'hypothèse d'un arrêt du retraitement. L'objectif de ces scénarios n'est pas de préfigurer un schéma industriel d'ensemble, mais d'examiner comment une architecture de stockage peut prendre en compte différents inventaires et modes possibles de gestion de l'aval du cycle électronucléaire. L'établissement de ces scénarios a fortement mobilisé les producteurs de déchets (EDF, CEA, Cogema).

Les scénarios considérés permettent de prendre en compte les combustibles usés, matières qui ne sont pas considérées comme des déchets. Dans l'hypothèse où ils ne seraient pas retraités, ils constituent un objet d'étude vis-à-vis des techniques de gestion des déchets. Il pourra alors s'agir de combustibles usés MOX (mélanges d'oxydes d'uranium et de plutonium) issus d'un recyclage du plutonium, ou encore de combustibles à l'uranium enrichi UOX.

Aux combustibles usés ou aux résidus de leur traitement s'ajoutent des déchets d'exploitation des réacteurs nucléaires (grappes de contrôle ou de commande), ainsi que des déchets d'exploitation et de maintenance des usines de retraitement (déchets dits « technologiques » - pièces remplacées ou obsolètes, contaminées par les matières radioactives traitées... - ; effluents liquides...).

On notera que des déchets proviennent aussi de l'usine aujourd'hui arrêtée de Marcoule, qui a retraité des combustibles de l'ancienne filière UNGG (Uranium naturel, graphite gaz).

Les déchets HAVL issus d'autres activités que la production électronucléaire (recherche, défense) sont en général des déchets technologiques.

On notera par ailleurs l'existence d'une petite quantité de combustibles usés issus de réacteurs de recherche ou militaires. Sans présager du traitement futur de ces éléments combustibles, l'éventualité de leur stockage a été explorée.

2.1.2 Conditionnement des déchets HAVL

Le conditionnement des déchets consiste à (i) solidifier, immobiliser les déchets qui ont été engendrés sous une forme dispersable - notamment liquide - (ii) placer les déchets dans un conteneur qui en facilite la manutention et l'entreposage dans les installations industrielles.

L'inventaire des déchets HAVL prend en compte des déchets de deux natures :

- des déchets d'ores et déjà produits, qui sont entreposés, sous forme conditionnée ou non, sur les sites de production ;
- des déchets à produire, soit avec un conditionnement dans la continuité du fonctionnement des installations nucléaires existantes, soit avec des adaptations qui ne sont pas encore connues précisément et qui dépendront notamment de la stratégie retenue pour la production énergétique et pour le cycle du combustible.

Pour constituer l'inventaire, il a été choisi³ de se référer à des déchets sous une forme conditionnée. Cela implique de connaître ou de formuler des hypothèses sur la nature et les modes de

³ Toutefois pour les assemblages de combustible usé, l'option d'un conditionnement directement sur le site de stockage est étudiée.

conditionnement et de colisage des déchets existants non encore conditionnés et des déchets futurs, ainsi que les nombres et volumes de colis dits « primaires » à considérer ; les colis primaires sont les objets qui seraient livrés sur un éventuel site de stockage.

L'identification des différents déchets et la définition de leur mode de conditionnement (qu'il existe aujourd'hui ou qu'il soit retenu comme hypothèse de référence) ont fortement mobilisé les producteurs. Il en ressort une variété relativement importante de familles de colis primaires, qui diffèrent par le contenu radiologique, le dégagement thermique qui découle de la présence de certains radionucléides, la nature physico-chimique du déchet ou des matériaux de conditionnement, et les dimensions.

On distingue classiquement les catégories de colis de déchets HAVL suivantes, qui présentent des problématiques propres :

- les déchets dits de catégorie B se caractérisent par une activité β - γ faible ou moyenne, et, en conséquence, par un dégagement thermique nul ou faible. Ils représentent le plus grand nombre de colis, ainsi que la plus grande variété de types de conditionnements. Leur inventaire total en radioisotopes à vie longue, relativement plus faible que celui des autres colis, est réparti dans le volume important qu'ils représentent ;
- les déchets de catégorie C sont constitués des produits de fission et actinides mineurs séparés lors du traitement des combustibles. Leur haute activité β - γ génère un dégagement thermique important, qui décroît dans le temps, principalement avec la décroissance radioactive des produits de fission à période moyenne (césium 137, strontium 90). Le conditionnement de ces déchets consiste en une incorporation dans une matrice de verre. La capacité de confinement de ce matériau est particulièrement élevée et durable s'il se trouve dans des conditions d'environnement physico-chimique favorables. La concentration des colis de déchets C vitrifiés en radionucléides à période longue, la température et le comportement physico-chimique du matériau d'immobilisation suggèrent une adaptation particulière des conditions de stockage. Les colis C existants ou envisageables à l'avenir se différencient en différents types (C0, C1, C2, C3, C4) suivant leur composition, les colis C0 (déchets anciens, tels que ceux entreposés sur le site de Marcoule) étant sensiblement moins exothermiques que les autres.

Les combustibles usés (repérés par les lettres « CU ») présentent aussi une haute activité, et par conséquent un dégagement thermique notable. Ce dégagement thermique est dû à leur contenu en produits de fission à période moyenne, en plutonium et américium (issu principalement de la désintégration du plutonium), ces deux derniers éléments conduisant à une décroissance plus lente dans le temps. D'autres spécificités sont les grandes dimensions des combustibles déchargés des réacteurs électronucléaires, s'il est choisi de les stocker en l'état, ainsi qu'un contenu plus important en matière fissile, associé à la question d'un risque de criticité. Les combustibles usés en provenance des centrales électriques se différencient en deux types, CU1 (combustibles UOX) et CU2 (combustibles MOX), fortement exothermiques. Les combustibles susceptibles de provenir d'autres réacteurs (recherche, défense) regroupés sous l'appellation CU3 sont sensiblement moins exothermiques.

Une description plus détaillée des colis primaires de déchets HAVL, de leur contenu radiologique, de leur dégagement thermique, de leur nature physico-chimique, figure au chapitre 3.

Au sein de chacune des catégories introduites ci-dessus, les diverses familles de colis de déchets HAVL ont été regroupées en un nombre plus limité de « colis types » représentatifs. Ces regroupements ont eu pour objectifs (i) d'approfondir les études en limitant le nombre de cas à traiter de manière spécifique, sans toutefois négliger la diversité des colis, (ii) de proposer autant que possible une standardisation des ouvrages et des moyens qui seraient mis en œuvre dans une installation de stockage. Cette démarche a permis d'étudier une solution de stockage possible pour chacun des colis inventoriés, indépendamment du fait que les autres catégories de déchets fassent ou non l'objet d'un stockage.

2.2 Les fonctions d'un stockage réversible

Les fonctions d'un stockage ont été recensées au moyen d'une analyse fonctionnelle, menée selon des méthodes classiques [4]. Cette démarche permet de s'assurer que l'ensemble des fonctions attendues est pris en compte.

L'objectif fondamental de la gestion à long terme des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) est de se protéger vis-à-vis des risques pour la santé et l'environnement associés à l'existence de ces déchets. La réponse que peut apporter un stockage consiste en un confinement des déchets dans la formation géologique étudiée. Ce confinement s'effectue de manière passive sur de grandes échelles de temps, étudiées jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années.

Une demande forte de réversibilité a été exprimée, au cas où un stockage serait mis en œuvre. L'Andra l'a prise en compte dans sa conception et l'a notamment traduite par la flexibilité du mode de gestion d'une installation de stockage.

La mise en œuvre d'un stockage impliquerait plusieurs activités industrielles. Celles-ci pourront concerner une période de temps d'ordre séculaire, plus habituelle pour une pratique humaine. Comme dans toute autre installation industrielle, elles doivent s'effectuer dans le respect de la protection des personnes et de l'environnement.

La capacité d'un stockage à protéger les personnes des risques associés aux déchets peut être appréciée au regard d'objectifs de sûreté. De tels objectifs ont été définis pour le long terme comme pour la phase d'exploitation industrielle.

2.2.1 Fonctions de sûreté d'un stockage à long terme

L'objectif fondamental d'un stockage en formation géologique profonde est rappelé par la règle fondamentale de sûreté RFS.III.2.f. [2]: « La protection des personnes et de l'environnement à court et à long terme constitue l'objectif fondamental assigné à un centre de stockage de déchets en formation géologique profonde ».

Cette protection des personnes et de l'environnement est réalisée en s'opposant à la dissémination des radionucléides contenus dans les déchets, sans reposer à terme sur une maintenance ou une surveillance [5]. La RFS précise en effet : « Elle [la protection des personnes et de l'environnement] doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives dans toutes les situations prises en compte sans dépendre d'un contrôle institutionnel sur lequel on ne peut se reposer de façon certaine au-delà d'une période limitée. »

Pour s'opposer à la dissémination radioactive aux différentes échelles de temps, on confère à une installation de stockage en formation géologique profonde des fonctions de sûreté multiples : en se complétant mutuellement, celles-ci optimisent les performances globales du système ; en offrant une certaine redondance, elles permettent de mieux résister à une défaillance ou à une agression externe.

On notera d'abord que le stockage en profondeur met les déchets à l'abri de phénomènes d'érosion et des principales activités humaines, qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain (§2.3 et [6] - Tome 3).

Dans ce contexte, le stockage (i) s'oppose à la circulation d'eau, (ii) limite le relâchement des radionucléides et les immobilise à l'intérieur du stockage lui-même, ce qui renvoie notamment à un besoin de « protéger » les déchets, (iii) retarde et atténue la migration des radionucléides qui auraient été relâchés par les déchets [7].

Pour cela, on mobilise le plus largement les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité, capacité de rétention, propriétés géochimiques, environnement hydrogéologique, voir section 2.2). L'âge de la formation, sa stabilité tectonique, la profondeur d'implantation du stockage permettent d'envisager une grande stabilité de ces propriétés favorables, aux échelles de temps étudiées ici (de l'échelle du millier d'années à celle de plusieurs centaines de milliers d'années).

Il convient donc de préserver les propriétés favorables du milieu géologique, en maîtrisant les perturbations qui pourraient résulter du creusement des ouvrages souterrains du stockage, des matériaux rapportés et de la présence des déchets, en particulier de la charge thermique qu'ils engendrent.

Au-delà de la phase d'exploitation et d'observation du stockage, les fonctions de sûreté d'un stockage sont passives, c'est-à-dire qu'elles ne nécessitent aucune intervention humaine.

Certaines fonctions ne sont utiles que tardivement. C'est en particulier le cas de la capacité du stockage à limiter la migration des radionucléides : cette capacité ne sera réellement exploitée que lorsqu'un début de relâchement par les colis interviendra. On parlera alors de fonctions latentes, dans la période où de telles fonctions sont d'ores et déjà disponibles mais non encore opérantes.

2.2.1.1 S'opposer à la circulation d'eau dans le stockage

Les formations géologiques profondes sont saturées en eau. L'arrivée d'eau et son renouvellement au voisinage des déchets constituent le principal facteur susceptible d'altérer les colis et de permettre le relâchement de radionucléides à l'intérieur d'un stockage. Une circulation de cette eau constitue ainsi un vecteur potentiel d'entraînement des radionucléides.

Aussi, un premier ensemble de fonctions visera à s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage ; de manière générale il s'agit de :

- limiter le débit d'eau au contact du stockage provenant d'une part des formations géologiques sus-jacentes traversées par les ouvrages d'accès⁴, d'autre part de la formation d'accueil du stockage elle-même ;
- limiter très fortement la vitesse de circulation de l'eau entre le stockage et les formations sus ou sous-jacentes.

Dans une période transitoire après la fermeture des installations souterraines de stockage, celles-ci se resaturent progressivement en eau [8]; les écoulements sont alors globalement convergents vers les installations, et la seconde fonction ci-dessus est latente.

Au-delà, les installations souterraines se seront resaturées, les pressions hydrauliques se rééquilibrent progressivement. La circulation de l'eau suit alors globalement le gradient hydrogéologique naturel. Le flux d'eau est fortement limité par la faible perméabilité de la formation d'implantation du stockage.

L'installation de stockage, par des dispositions d'architecture et de scellement, peut aussi contribuer à cette fonction.

2.2.1.2 Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage

L'arrivée d'eau sur les déchets ne pouvant pas être exclue à terme, il importe de limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques dans l'eau, de les « immobiliser » dans les déchets ou au plus près.

Pour ce faire, on cherche en premier lieu à disposer de colis de déchets évitant la dispersion des radionucléides, par exemple grâce à la matrice dans laquelle sont incorporés les radionucléides ou aux conteneurs dans lesquels les déchets sont placés. L'altération aqueuse des déchets et de leur conditionnement est limitée en les plaçant dans des conditions d'environnement, physiques et chimiques, favorables.

Les fonctions correspondantes dépendent de la catégorie de colis considérée : déchets B, déchets C vitrifiés ou combustibles usés.

Ainsi, pour les déchets B, le stockage protège de la corrosion les pièces métalliques qu'ils contiennent, en réalisant un environnement chimique favorable (potentiel réducteur, pH 10 à 12,5). En particulier pour les déchets enrobés dans du bitume, les conditions de stockage permettent de bénéficier

⁴ Sur le site de Meuse/Haute-Marne, les formations géologiques sus-jacentes sont peu aquifères et le débit d'eau qui y circule est donc limité.

durablement des propriétés de confinement du bitume [9], en contrôlant sa température (entre 20 et 30 °C), en préservant la géométrie de l'enrobé, en contrôlant le pH de l'eau atteignant le bitume (pH 10 à 12,5).

Pour les colis de déchets C vitrifiés, une première fonction est d'interdire l'arrivée d'eau au contact du verre pendant la période caractérisée par une température relativement élevée, dont la durée est au plus de l'ordre du millénaire [10]. Il convient en effet d'éviter un relâchement de radionucléides aussi longtemps que la température ne permet pas de rendre compte, de manière fiable, du comportement de ces radionucléides, compte tenu des limites actuelles de connaissances [11]. Il s'agit d'autre part de protéger le verre d'un risque d'accroissement, avec la température, de son altérabilité au contact de l'eau, en lien avec les modèles de comportement aujourd'hui considérés [9].

Au-delà de la phase thermique, on recherche à limiter l'altération du verre en réduisant les possibilités de transport des espèces dissoutes, à son voisinage, pour favoriser un équilibre chimique entre l'eau et le verre, et en contrôlant le pH (de préférence entre 7 et 9) du fait de la sensibilité à ce paramètre de la solubilité de la silice, élément constitutif majeur du verre.

Enfin, pour les combustibles usés, il s'agit aussi d'interdire l'arrivée d'eau sur les assemblages pendant la phase thermique. Au-delà et afin de limiter la dissolution du combustible, on cherche à contrôler le transport des espèces dissoutes au voisinage des assemblages, ainsi que la chimie de l'eau (pH neutre à alcalin, conditions réductrices).

Dans un second temps, lorsque l'altération des colis par l'eau, rendue faible par les fonctions qui précèdent, a démarré, les conditions de stockage visent à limiter la mobilité des radionucléides, pour tous les types de déchets.

Cette fonction concerne les éléments susceptibles de se dissoudre dans l'eau lors de l'altération des déchets ; une grande part peut rester, ou être re-précipitée, sous forme solide, grâce à des conditions géochimiques réductrices (complétées par le contrôle du pH) ; seuls quelques radionucléides (iode 129, chlore 36 en particulier) sont insensibles à ces conditions géochimiques favorables.

Elle concerne aussi les radionucléides qui pourraient se trouver sous la forme de microparticules en suspension dans l'eau (des particules colloïdales peuvent se former lors de l'altération des colis, de la précipitation de radionucléides, ou préexister dans le milieu, et sorber des radionucléides dissous). Le milieu géologique assure une fonction de filtration physique permettant d'immobiliser ces particules.

Enfin, on peut noter que la nature physico-chimique de certains déchets B peut conduire à former des espèces complexantes, lors de leur altération aqueuse ; en solution dans l'eau, ces espèces sont susceptibles d'accroître la mobilité de certains radionucléides. Aussi on limitera l'impact de ces perturbations chimiques en éloignant lorsque possible les sources potentielles d'espèces complexantes des autres déchets.

2.2.1.3 Retarder et atténuer la migration des radionucléides vers l'environnement

Afin de protéger l'homme et l'environnement des radionucléides et des éléments chimiques toxiques qui auront pu être relâchés par les déchets, une fonction du stockage est de retarder et d'atténuer le flux relâché.

Pour ce faire, la migration des radionucléides dissous dans l'eau est contrôlée par la diffusion, la dispersion et la rétention dans la formation d'accueil du stockage [12] : la formation du Callovo-Oxfordien est ainsi mobilisée pour la faible perméabilité des argilites, leur faible coefficient de diffusion et leur capacité de rétention. La dissolution dans l'eau des radionucléides susceptibles d'être relâchés sous forme gazeuse permet de gérer de manière similaire ces éléments.

La migration des radionucléides pourra aussi être retardée à l'intérieur de certains composants du stockage. Ceci pourra contribuer en complément à réduire l'impact potentiel, sur l'homme et l'environnement.

Les radionucléides qui pourraient être relâchés hors de la formation géologique d'accueil du stockage se disperseront à long terme dans les formations géologiques environnantes, avant d'atteindre l'environnement accessible à l'homme.

2.2.1.4 Préserver les propriétés favorables du milieu, limiter les perturbations induites par le stockage

Afin de permettre de mobiliser l'ensemble des propriétés favorables de la formation du Callovo-Oxfordien, pour réaliser les fonctions de sûreté qui précèdent, la conception et les méthodes de réalisation du stockage cherchent à limiter les perturbations qu'il peut provoquer dans le milieu.

Une première fonction est de dissiper la chaleur engendrée par la radioactivité des déchets. En effet, la hausse de température due à ce dégagement thermique peut engendrer des processus couplés complexes pour des températures supérieures à 100 °C dans la roche. Elle pourrait aussi provoquer des transformations minéralogiques irréversibles de l'argilite du Callovo-Oxfordien si de trop fortes températures étaient atteintes sur de trop longues durées. Les études montrent qu'une sollicitation de 100 °C sur 1 000 ans puis de 70 °C sur 10 000 ans n'induit pas ou très peu de transformations irréversibles.

Pour rester dans un domaine de fonctionnement où les phénomènes sont connus et réduire l'endommagement de l'argilite, l'objectif est de limiter la température de l'argilite à ces valeurs. Concrètement, la conception thermique du stockage vise à limiter la température à 90 °C au contact de l'alvéole de stockage et des argilites et à vérifier que la température est bien inférieure à 70 °C à une échelle de 10 000 ans. Cette fonction concerne particulièrement les déchets C vitrifiés et les combustibles usés.

Une deuxième fonction importante 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. Or l'ouverture de cavités souterraines, dans un milieu soumis à des contraintes mécaniques naturelles liées au poids des terrains, engendre des déformations au voisinage. De plus, pour les colis de haute activité, une cause de déformation supplémentaire est la dilatation thermique des matériaux, sous l'effet de la chaleur dégagée par les déchets. Si les déformations dépassent la résistance de la roche, elles peuvent y provoquer localement des dommages ; ceux-ci se traduiraient alors par une augmentation de perméabilité, plus ou moins élevée selon l'importance du dommage (microfissuration, fracturation) (voir infra, § 2.3.2.3 et [13]). Ainsi, un objectif important est de limiter les déformations mécaniques induites par le stockage, afin d'éviter ou de limiter l'intensité et l'extension des dommages que celles-ci peuvent provoquer dans la roche, de manière à ne pas affaiblir les fonctions de sûreté précédentes (opposition à la circulation d'eau, retard et atténuation de la migration des radionucléides).

Il convient aussi de vérifier que les perturbations d'origine hydrique (désaturation du milieu lors des travaux) et chimique (apport d'oxygène et de matériaux divers), éventuellement couplées avec les perturbations mécaniques, n'engendrent pas de dommages préjudiciables dans le milieu.

Enfin, le contenu en matière fissile de certains colis conduit à s'assurer que le stockage reste dans une configuration sous-critique, en tenant compte des déplacements potentiels de matière et de l'évolution des matériaux à long terme.

2.2.1.5 Les fonctions de sûreté dans le temps

La figure suivante récapitule l'ensemble des fonctions de sûreté disponibles au cours du temps. Pour chaque période dans l'échelle des temps, elle distingue les fonctions opérant directement sur la protection de l'homme et de l'environnement et les fonctions latentes. Ces dernières peuvent plus particulièrement contribuer à protéger l'homme et l'environnement dans des situations hypothétiques où une fonction opérante serait dégradée.

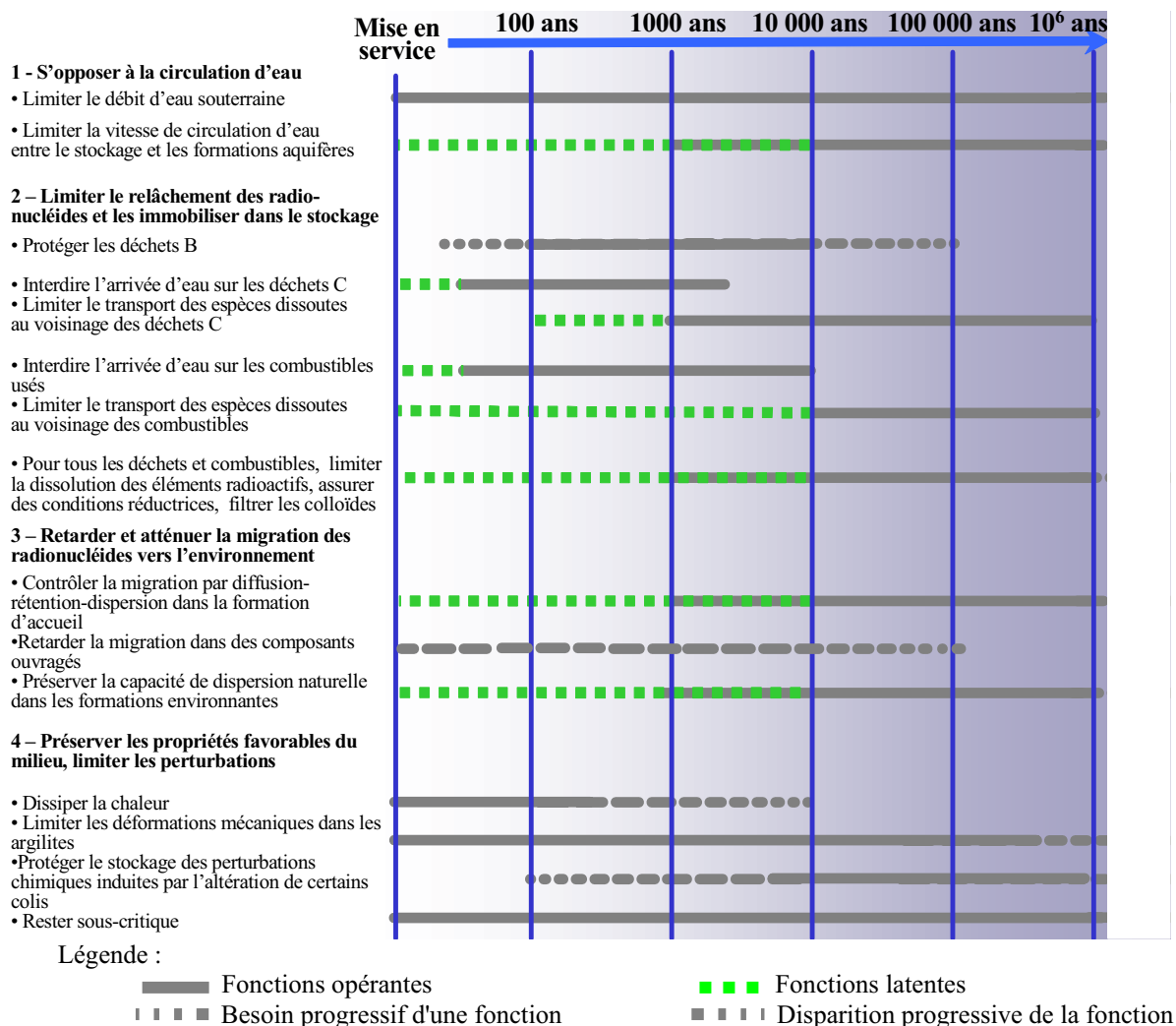


Figure 2.2.1 Fonctions de sûreté au cours du temps

2.2.2 La réversibilité, les étapes de mise en oeuvre d'un stockage

L'étude de la réversibilité du stockage est prévue par la loi du 30 décembre 1991. En juin 1998, la Commission nationale d'évaluation (CNE) a remis, à la demande du gouvernement, un rapport sur la réversibilité [14]. En décembre 1998, le gouvernement a rendu publique une déclaration qui soulignait que les recherches devaient s'inscrire dans une logique de réversibilité [15].

Diverses raisons plaident pour la réversibilité du stockage : leur analyse a permis d'éclairer la recherche de réponses techniques. Il en ressort le besoin d'élargir la définition de la réversibilité, au-delà de la capacité à retirer des colis stockés (la « récupérabilité ») : la réversibilité peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et « flexible » du processus de stockage, en laissant aux générations à venir une liberté de décision sur ce dernier.

L'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE) a introduit clairement la distinction entre « récupérabilité » et réversibilité, en montrant en quoi la réversibilité a un champ d'action plus large que la « récupérabilité » [16]. Le groupe international d'experts qui a réalisé ce travail met en particulier en exergue le lien entre réversibilité et approche par étapes successives suivant un processus prudent et souple, qui fait partie des « bonnes pratiques ».

Dans cette optique, le processus de stockage peut être décomposé en une succession d'étapes à franchir. Il s'agit alors d'offrir une souplesse aussi grande que possible dans la gestion de chaque étape,

notamment en ménageant la possibilité d'un temps d'attente et d'observation, avant de décider de passer à l'étape suivante, ou encore celle de revenir en arrière.

La réversibilité pourra s'évaluer dans ce cadre par (i) la capacité de retirer des colis stockés, (ii) la capacité d'action sur le processus de stockage, (iii) la possibilité de faire évoluer la conception des ouvrages au cours du processus.

Au final, elle concourt à fournir un outil de pilotage du stockage en fonction des attentes des diverses générations concernées.

2.2.2.1 La prise en compte de la réversibilité

La demande de réversibilité apparaît liée à une recherche d'ouverture dans la prise de décision en matière de gestion à long terme des déchets radioactifs. Il s'agit alors de préférer des décisions mesurées, laissant les choix ouverts aux générations suivantes, où le décideur ne serait pas figé techniquement, sans qu'il y ait pour autant soupçon de « laisser-faire ». La réversibilité ouvre ainsi la possibilité d'une négociation entre options techniques et enjeux sociaux [17].

Cette approche de la réversibilité peut relever du principe de précaution ([18], [19]). La préservation de la réversibilité et le développement des moyens nécessaires renvoient à une conduite « prudente » pour l'action en contexte incertain, dû notamment à la longue période de temps de la gestion des déchets radioactifs considérés.

L'application du principe de précaution renvoie aussi à une attitude de modestie scientifique. Il s'agit de prendre acte des incertitudes et des limites des connaissances à un moment donné, en regard des échelles de temps impliquées. Dans le cadre de la mise en œuvre réversible d'un stockage, on peut ainsi envisager la possibilité d'observations sur de longues périodes, pour les confronter avec des modélisations, actualiser ainsi les connaissances, et amener des éléments supplémentaires en support aux décisions, contribuant ainsi à la confiance en le système d'ensemble.

2.2.2.2 Sûreté et réversibilité

Même si sa mise en œuvre implique les générations à venir, la conception d'un stockage se doit d'être robuste en matière de protection à long terme de l'homme et de l'environnement, ce qui constitue l'objectif premier d'une telle installation. La prise en compte de la réversibilité n'autorise aucun compromis vis-à-vis des objectifs de sûreté.

La sûreté et la réversibilité trouvent toutes deux un fondement dans une attitude de modestie, conduisant à prendre acte de l'existence d'incertitudes et à les gérer dans le respect du droit des générations futures. La première conduit, au stade de la conception d'une installation, au choix d'options techniques robustes, la seconde renvoie à une gestion prudente de cette installation.

Ainsi, les incertitudes de connaissance actuelles ont été prises en compte systématiquement dans le choix des options techniques présentées dans la suite.

Par ailleurs, il convient que des dispositions qui pourraient trouver leur justification, au moins partiellement, dans la prise en compte de la réversibilité, ne soient pas susceptibles de dégrader des fonctions de sûreté. Ainsi, aucune disposition technique pouvant perturber significativement un élément contribuant à une fonction de sûreté, n'est ajoutée dans le seul objectif de réversibilité. En effet, dans un tel cas réversibilité et sûreté pourraient entrer en conflit, et la sûreté primerait. Par exemple, on ne peut justifier par la seule prise en compte de la réversibilité, l'introduction de matériaux qui induisent une perturbation d'une nature nouvelle ou d'un ordre de grandeur significativement différent de celles qui préexistent pour d'autres raisons.

2.2.2.3 Organisation du processus de stockage en étapes

Si la réalisation d'une installation de stockage était décidée, sa première phase de vie opérationnelle correspondrait à la construction d'installations de service en surface et d'ouvrages d'accès à la formation géologique d'accueil, ainsi qu'à la préparation d'installations souterraines de stockage.

Elle serait suivie par une phase d'exploitation et d'observation, correspondant à la mise en stockage de colis de déchets. La recherche de flexibilité conduit à ne pas fixer de durée a priori pour la phase d'exploitation et d'observation : l'échelle de temps envisageable est séculaire à pluriséculaire.

La prise en compte de la réversibilité se traduit d'abord par une souplesse de gestion des colis mis en stockage, comparable à un entreposage.

Mais un stockage est aussi conçu pour pouvoir être fermé et de ce fait rendu passif⁵ : la fermeture consiste principalement à remblayer et à sceller les installations souterraines.

La recherche de flexibilité suggère alors une fermeture qui serait progressive. Cela ouvre la possibilité d'une diminution graduelle du niveau de réversibilité du stockage, au fur et à mesure que des choix auront été faits.

Ainsi, la construction, l'exploitation puis la fermeture d'un stockage sont structurées suivant une succession d'étapes. Celles-ci peuvent être conduites indépendamment pour chaque catégorie de déchets.

L'étape initiale correspond à la construction d'une unité (ou module), de stockage ; il s'agit ensuite d'y mettre en place des colis.

La fermeture, conçue de manière progressive, donne lieu à plusieurs étapes : fermeture de modules, fermeture des accès à ces modules, des installations de stockage de la catégorie de déchets concernée, et enfin de l'ensemble des installations souterraines. Quant aux installations de surface, leur déconstruction⁶ pourrait, pour partie, commencer avant la fin de la fermeture des installations souterraines, elle s'achèverait ensuite.

Les premières étapes d'exploitation peuvent s'apparenter à une phase d'entreposage, qui serait réalisée en souterrain. On notera qu'à la différence d'une installation dédiée à l'entreposage, une grande part des éléments devant contribuer aux fonctions de sûreté à long terme sont d'ores et déjà présents, et qu'il est possible de les observer en situation.

La conception modulaire des installations permet une construction par phases successives, donnant ici encore une liberté de choix dans le pilotage du développement d'un stockage

L'approche par étape pour la gestion d'un stockage a fait l'objet de travaux au niveau international. Une action concertée menée dans le cadre de l'Union européenne sur la réversibilité des différents concepts de stockage étudiés dans les programmes nationaux, a montré la pertinence d'un découpage du processus de stockage en étapes pour analyser et appréhender cette question et fournir un cadre progressif à la prise de décision [20]. Dans une même logique, on peut aussi noter des réflexions aux États-Unis sur la conception du stockage par étapes. Dans la démarche par étapes (« adaptive staging ») proposée par le National Research Council (NRC), un éventail de choix le plus large possible est offert à chaque étape aux décideurs [21]. Le NRC met en avant les avantages de cette approche par rapport à une approche « linéaire » (« linear staging ») tant du point de vue technique que social, politique et économique.

⁵ Après fermeture, les fonctions de sûreté présentées plus haut seront assurées sans nécessiter d'intervention directe de l'homme.

⁶ L'opération comprend la déconstruction des installations de surface ainsi que la mise en état définitif du stock de déblais (« verse») en surface.

2.2.2.4 Capacité de retirer les colis stockés, capacité d'action sur le processus de stockage, réversibilité de conception

Au fur et à mesure que des choix ont été faits et que des étapes ont été franchies dans le processus de fermeture, le niveau de réversibilité pourra diminuer. Les options techniques présentées dans la suite visent à ce que cette diminution soit aussi progressive et maîtrisée que possible.

La capacité de retirer des colis de déchets est évaluée jusqu'au chargement de ces colis sur des moyens de transport vers d'autres sites. Dans les premières étapes d'exploitation, la récupération des colis s'effectue comme en entreposage, par simple inversion du processus de mise en stockage. Au fur et à mesure du franchissement d'étapes de fermeture, la capacité de retirer des colis implique la possibilité de ré-ouvrir et dé-sceller les installations.

La capacité d'action sur le processus de stockage est la possibilité donnée aux futurs exploitants de gérer avec souplesse chaque étape. Cela concerne la durée techniquement possible avant passage à l'étape suivante ou retour en arrière, la capacité de maintenir les installations en état. L'observation du comportement des installations de stockage fournit des éléments de connaissance sur l'état et l'évolution du stockage, en appui à sa gestion.

Par ailleurs, les nouveaux ouvrages pourront être conçus (ou re-conçus) au fur et à mesure du développement phasé des installations du stockage. Cette conception bénéficiera en particulier de l'expérience et des connaissances acquises au cours de l'exploitation et de l'observation des ouvrages antérieurs, ainsi que des progrès techniques réalisés par ailleurs. Elle pourra prendre aussi en compte des données provenant de l'environnement social, technique et scientifique.

Il est à noter que la gestion réversible du stockage s'accompagne d'une gestion des connaissances sur la durée, qu'il s'agisse de connaissances scientifiques ou de la configuration technique du stockage.

Une analyse de la gestion réversible du stockage (capacité d'action au fur et à mesure de l'avancement du processus, capacité de retirer les colis stockés) est présentée au chapitre 10.

2.2.3 Mise en stockage de colis de déchets

La mise en stockage des colis de déchets met en œuvre des activités industrielles [22]. Elles consistent à (i) recevoir les colis primaires livrés par les producteurs de déchets (ii) les placer physiquement au sein de la formation d'accueil du Callovo-Oxfordien (iii) gérer les colis stockés et les installations.

Les processus industriels d'exploitation engendrent des risques, liés en particulier à la manutention de matières radioactives : le public, le personnel et l'environnement doivent en être protégés.

2.2.3.1 Recevoir les colis primaires de déchets

Les colis primaires qui seraient livrés sur le site de stockage, proviendront de sites de production ou d'entreposage, en empruntant le réseau routier ou ferroviaire. Il faudra alors assurer la réception des emballages et moyens de transport, leur déchargement, le renvoi des emballages et moyens de transport vers les sites de production ou d'entreposage⁷.

La prévention de la dissémination de matières radioactives passe par des contrôles des emballages⁸ et moyens de transport, la possibilité d'une décontamination éventuelle de ces équipements et de gestion des effluents et déchets radioactifs induits par ces opérations.

On notera en particulier la protection et le contrôle des matières nucléaires contenues dans l'installation [23].

⁷ Les emballages renvoyés seront généralement vides. Ils pourront toutefois être remplis de colis de déchets s'il était décidé de ne pas décharger des emballages ou de déstocker des colis (après leur retrait du stockage).

⁸ Dans le cas de la réception de combustibles usés, on contrôlera notamment l'absence de crayons nus ruptés à l'intérieur des emballages.

2.2.3.2 Placer les colis dans les argilites du Callovo-Oxfordien

Afin de mettre en place les colis dans les argilites, il faut d'abord, dans le cadre d'un développement progressif du stockage, réaliser des installations souterraines.

Cela suppose une reconnaissance des volumes d'argilites qui accueilleront les colis. Il s'agit de vérifier leurs bonnes propriétés locales, et, éventuellement, de caler les données utilisées pour dimensionner les ouvrages. Cette reconnaissance peut s'effectuer par étapes au fur et à mesure du développement du stockage, chaque étape apportant des connaissances complémentaires précises à chaque zone de stockage créée. Elle mobilise des méthodes classiques de reconnaissance géologique.

Puis vient le creusement de nouvelles capacités de stockage et de leurs ouvrages de desserte : il s'agit d'abattre les argilites, de les charger (marinage) et les extraire jusqu'en surface, de stocker les déblais, en préservant la possibilité d'une utilisation ultérieure des argilites extraites pour remblayer les installations souterraines.

Il faut enfin équiper ces installations de stockage : préparer, acheminer au fond et installer les équipements nécessaires à l'exploitation, et ceux contribuant à la réalisation de fonctions de sûreté.

Par ailleurs, le conditionnement primaire des déchets, c'est-à-dire tel qu'effectué par les producteurs, peut devoir être complété, afin de faciliter l'exploitation ou de réaliser des fonctions de sûreté après fermeture. Les options techniques présentées dans la suite adoptent l'hypothèse d'une réalisation de ces compléments de colisage sur le site de stockage.

Enfin, il faut transférer les colis ainsi préparés jusqu'à leur emplacement de stockage, en assurant la protection du personnel d'exploitation vis-à-vis des risques d'exposition externe et interne aux rayonnements ionisants.

À chaque étape du processus, il est procédé à une caractérisation des différents objets réalisés : il s'agit de dresser un état de chaque objet, et de l'enregistrer afin de renseigner et tenir à jour la connaissance du stockage.

En soutien à l'ensemble de ces activités, deux fonctions apparaissent particulièrement importantes :

- ventiler les installations, afin d'y permettre l'intervention de personnels [24], et d'y maîtriser les risques potentiels liés à l'accumulation de gaz (notamment l'hydrogène généré par radiolyse des matériaux dans certains colis de déchets B) ;
- soutenir mécaniquement les cavités souterraines, pour assurer leur stabilité dimensionnelle, leur sécurité, et pour limiter les déformations des argilites.

2.2.3.3 Gérer les installations

La gestion des installations s'inscrit dans la logique de réversibilité présentée plus haut ; elle comprend leur maintenance, leur observation, la possibilité de retirer des colis stockés, ici encore en limitant la dissémination radioactive.

La possibilité de fermer les installations souterraines implique de préparer les matériaux de remblayage et de scellement, les acheminer au fond, puis de construire les ouvrages de fermeture.

2.2.3.4 Fonctions de sûreté nucléaire opérationnelle

Les activités industrielles présentées ci-dessus impliquent de mettre en œuvre des « fonctions de sûreté opérationnelle » comparables aux pratiques usuelles des installations nucléaires.

Il importe d'abord de confiner les matières radioactives pour en prévenir la dissémination. En particulier, les rejets de radionucléides gazeux susceptibles d'être relâchés par certains déchets seront limités autant que possible, et contrôlés ([25] ,[26]). Les dispositions de contrôle de la contamination se rattachent aussi à cet objectif.

Il faut aussi protéger les opérateurs et le public contre l'irradiation. Ceci se traduit par l'interposition d'écrans de protection fixes ou mobiles, par l'éloignement des opérateurs vis-à-vis des sources de rayonnement et la gestion de leur durée d'exposition.

Un autre objectif concerne la sûreté-criticité. Cet objectif a été mentionné plus haut pour le long terme, et s'applique naturellement dès la réception des colis ; 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 [27]. Cet objectif se traduit par un contrôle des matières fissiles, des géométries et éventuellement l'interposition de matériaux neutrophages.

On notera aussi le besoin d'évacuer les gaz (notamment de radiolyse) et la puissance thermique émise par certains colis de déchets, en vue de limiter les niveaux de température dans les installations. La ventilation y contribue durant l'exploitation.

2.2.4 Objectifs de protection des personnes après fermeture

Le niveau de protection de l'homme, vis-à-vis du risque induit par les radionucléides, peut être évalué par la dose efficace⁹ engagée¹⁰ individuelle, pour une exposition prolongée d'une personne d'un groupe critique, c'est-à-dire d'un groupe d'individus potentiellement le plus exposé. On peut ainsi se donner un objectif permettant d'apprécier la capacité de la conception du stockage à protéger les personnes des risques liés aux radionucléides.

Pour la période après fermeture, la Règle Fondamentale de sûreté n° III.2.f note que l'impact radiologique d'un stockage ne devra pas dépasser $\frac{1}{4}$ millisievert par an (mSv/an), pour un scénario de référence incluant un ensemble d'événements naturels probables [2]. En tout état de cause, l'objectif est de rendre cette valeur aussi faible que raisonnablement possible.

Cette valeur de $\frac{1}{4}$ mSv/an par an correspond à une fraction de la limite d'exposition individuelle du public (1 mSv/an), retenue par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et la directive Euratom 96/29, hors exposition individuelle à des fins médicales ainsi qu'à la radioactivité naturelle [28]. On peut, à titre d'illustration, rappeler que l'exposition individuelle à la radioactivité naturelle représente 2,4 mSv/an en moyenne en France ; celle-ci résulte de l'inhalation de radon dégagé par le sol, de l'ingestion d'aliments et de boisson (contenant notamment du potassium 40), de l'irradiation externe par les sols et les murs des habitations, et enfin du rayonnement cosmique.

L'objectif de protection des personnes porte sur une très grande durée après la fermeture du stockage. Pour l'approche de sûreté globale, la RFS recommande de conduire des études sur le comportement d'un éventuel stockage sur le très long terme en distinguant deux périodes :

- avant dix mille ans, période pour laquelle la stabilité du milieu géologique permet d'attester les prévisions d'impact radiologique de manière objective ;
- après dix mille ans, période pour laquelle des estimations majorantes (avec des valeurs pessimistes) pourront être proposées, compte tenu d'un accroissement progressif des incertitudes avec le temps.

Il convient aussi de vérifier que la conception d'un stockage respecte la protection de l'environnement vis-à-vis d'impacts autres que radioactifs (notamment la toxicité chimique d'éléments qui seraient contenus dans certains déchets, ou introduits avec les matériaux de construction du stockage). Cela conduit notamment à éviter l'emploi d'éléments toxiques labiles dans la réalisation des colis et des installations de stockage ; on notera aussi que les fonctions de sûreté d'un stockage permettent de fait, de réduire l'impact des éléments toxiques sur l'environnement.

⁹ La dose "efficace" prend en compte, outre l'énergie délivrée à la matière sous forme de rayonnement, la nature plus ou moins nocive de ce rayonnement et la sensibilité des tissus ou organes irradiés.

¹⁰ La dose "engagée" prend en compte l'effet continu de l'irradiation des tissus par un radionucléide ingéré dans le corps.

2.2.5 Protection des personnes pendant l'exploitation et l'observation d'un stockage

Le public et le personnel doivent être protégés des risques radiologiques associés aux activités industrielles. Pour la phase d'exploitation, l'Andra a retenu, comme objectif de protection du public une dose annuelle individuelle inférieure à $\frac{1}{4}$ mSv/an. Pour les travailleurs directement affectés au travail sous rayonnement ionisant, et bénéficiant de ce fait d'un suivi renforcé, l'objectif est de limiter la dose individuelle annuelle en restant inférieur à 5 mSv/an.

Les personnes doivent aussi être protégées vis-à-vis d'autres nuisances potentiellement générées par l'exploitation d'un stockage [29], en particulier :

- l'exposition aux poussières ;
- l'exposition à des gaz potentiellement toxiques ;
- l'exposition à la température (résultant notamment de la chaleur dégagée par les déchets) ;
- les risques accidentels (voir le chapitre 11 — La sûreté opérationnelle : incendie, déflagration, chute de bloc ou d'effondrement dans les installations souterraines, risques électriques...).

On notera enfin les contraintes de protection de l'environnement durant l'exploitation industrielle (eaux souterraines et superficielles [30], air [31], paysage, et, pour mémoire à ce stade, voisinage, sols, faune et flore).

2.3 Le contexte géologique du site de Meuse/Haute Marne – La formation du Callovo-Oxfordien

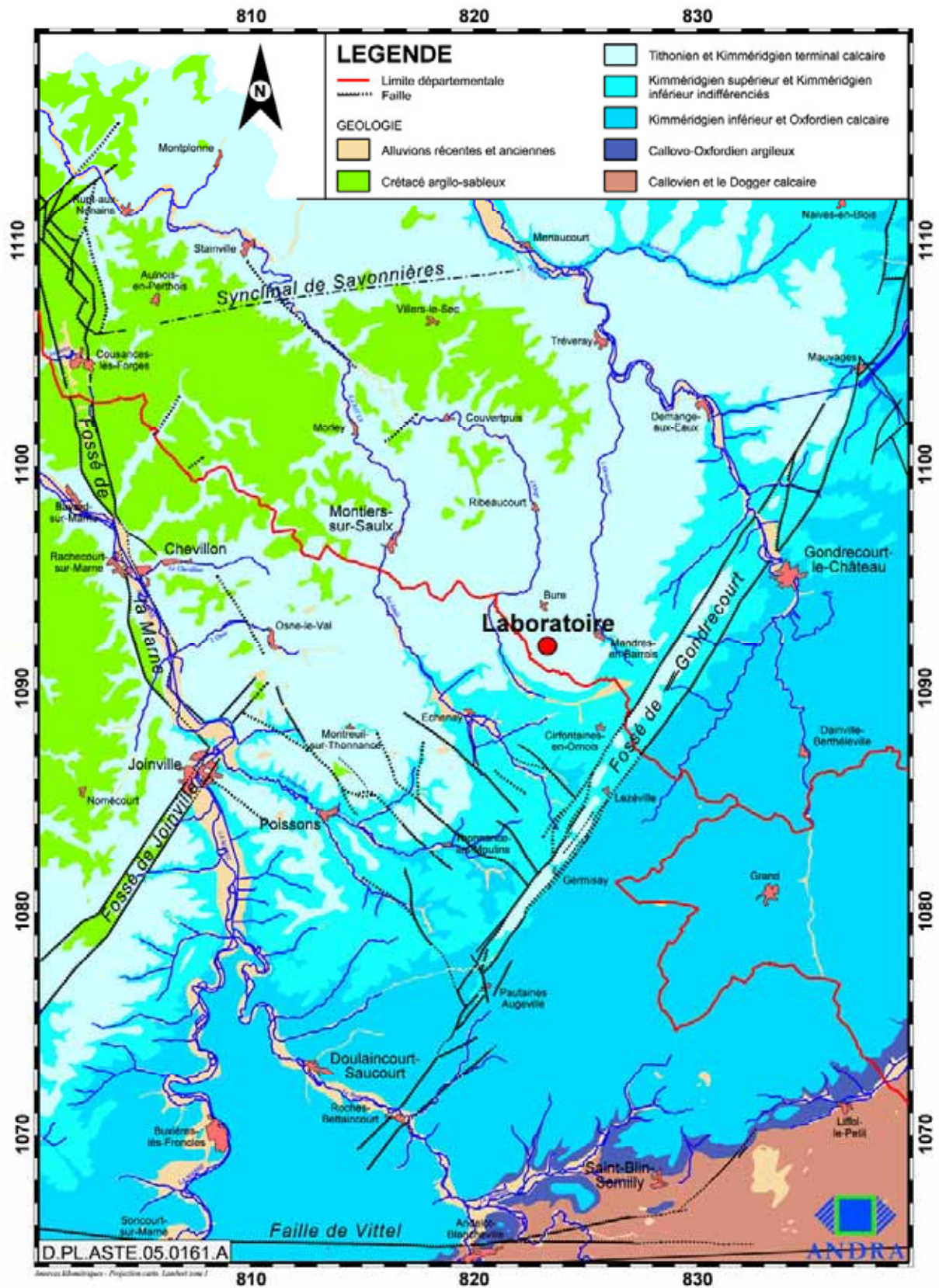


Figure 2.3.1 Carte géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne

Cette section introduit de manière synthétique le contexte géologique du site de Meuse/Haute-Marne, ainsi que les différents résultats obtenus sur les propriétés des argilites du Callovo-Oxfordien.

Comme indiqué plus haut, les caractéristiques de la formation argileuse, étudiée notamment au moyen du laboratoire de recherche souterrain, contribuent fortement à la réalisation des fonctions de sûreté du stockage : il s'agit en particulier de son épaisseur, sa continuité, sa perméabilité, sa capacité de rétention, sa stabilité géodynamique. Le contexte hydrogéologique à plus grande échelle intervient aussi dans l'évaluation des performances à long terme du stockage.

L'étude de la mise en stockage des déchets et la maîtrise des perturbations s'appuient en outre sur la connaissance d'autres caractéristiques de la formation d'accueil : pendage, profondeur, comportements mécanique et thermique.

2.3.1 Présentation générale du secteur étudié

Géologiquement, le site de Meuse/Haute-Marne appartient à la bordure orientale du Bassin de Paris ; ce bassin forme une cuvette dont le point bas correspond à l'Île de France. Dans la zone étudiée, le Bassin de Paris est constitué d'une alternance de couches sédimentaires à dominante argileuse et de couches calcaires ; ces couches se sont déposées entre -250 millions et -135 millions d'années ([6] - Tome 1).

Dans le détail, la série sédimentaire concernée plus particulièrement par l'étude est constituée, de bas en haut (et d'est en ouest aux affleurements), par :

- la formation calcaire du Dogger reposant sur les marnes et argiles liasiques ;
- la formation argileuse du Callovo-Oxfordien ;
- la formation calcaire de l'Oxfordien moyen à supérieur ;
- le Kimméridgien marneux ;
- à l'affleurement au niveau du site, les Calcaires du Tithonien (dits Calcaires du Barrois) ;
- quelques placages de Crétacé argilo-sableux, de faible épaisseur, couronnant les points les plus élevés de la topographie.

Ces couches sédimentaires présentent une structure simple, monoclinale, avec un faible pendage régulier de 1 à 1,5 degré vers le nord-ouest.

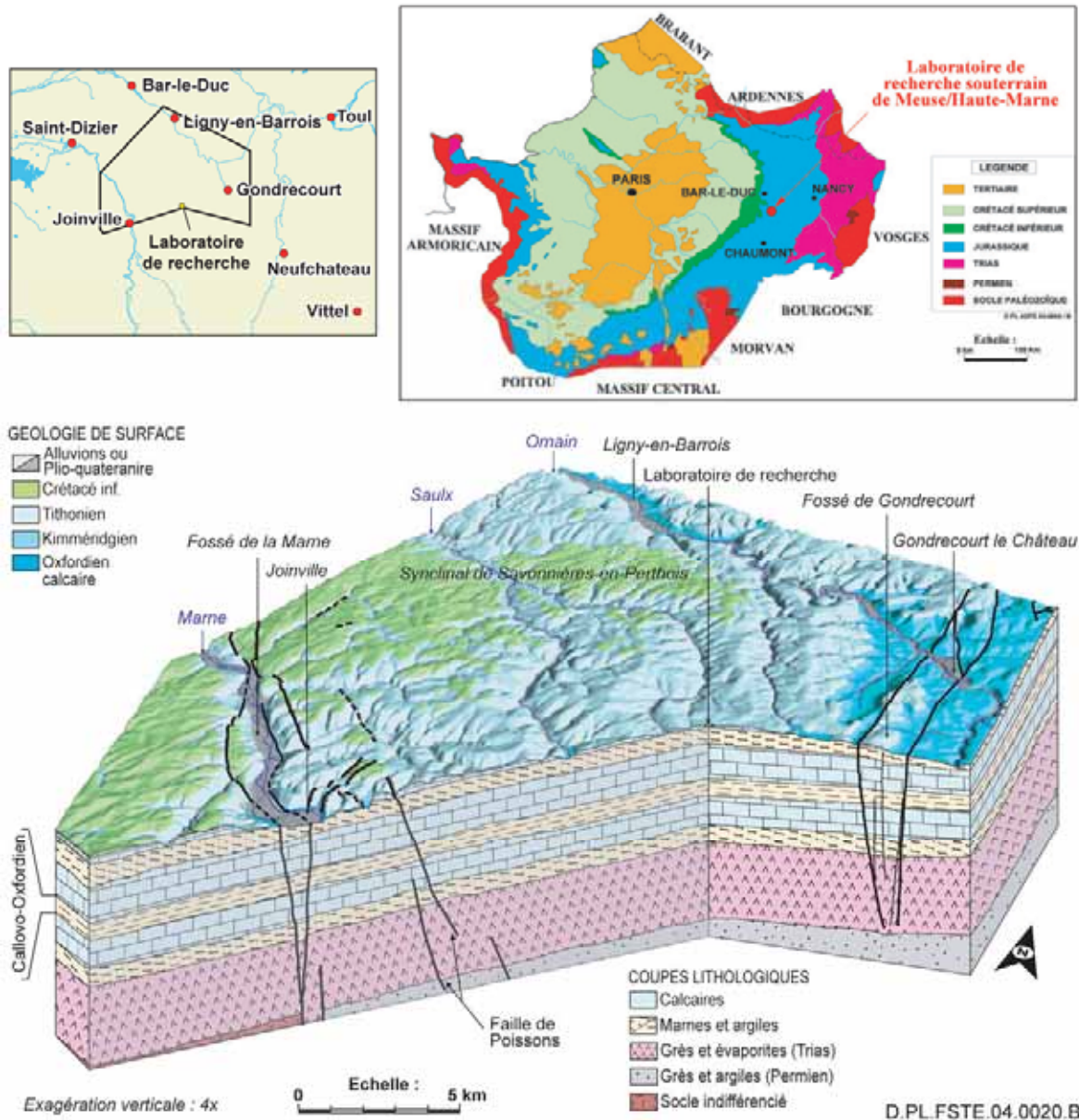


Figure 2.3.2 Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute Marne

Au sein de la série sédimentaire, la formation argileuse étudiée est celle des argilites du Callovo-Oxfordien. Cette couche a pour origine la sédimentation de matériaux détritiques (minéraux argileux jusqu'à 60 % en masse, quartz fins) et de carbonates dans une mer relativement calme. Elle présente une grande extension géographique.

Les recherches ont conduit à définir une zone dite de transposition d'environ 200 km² à l'intérieur de laquelle les propriétés observées sur le site de Meuse/Haute-Marne semblent transposables. Cette zone a été délimitée, notamment en se plaçant à l'écart des failles du secteur (faille de la Marne, fossé de Gondrecourt...).

Sur cette zone, le Callovo-Oxfordien est une couche homogène, peu perméable, dont le toit se trouve à une profondeur variant de 420 mètres (correspondant au site du laboratoire) à plus de 600 mètres suivant la direction du pendage, et dont l'épaisseur varie aussi progressivement de 130 mètres au sud à 160 mètres au nord de la zone.

Verticalement, les proportions des phases minéralogiques principales varient et s'organisent en trois séquences sédimentaires¹¹. La séquence supérieure se caractérise par une teneur en carbonates plus élevée.

Les argilites du Callovo-Oxfordien se sont mises en place entre -158 et -152 millions d'années. Les sédiments déposés ont été progressivement compactés, pendant une quinzaine de millions d'années, sous le poids des dépôts ultérieurs (au moins 500 mètres de sédiments); ce processus s'est accompagné d'une expulsion d'eau. Les argilites ont dès lors acquis des propriétés proches de celles qu'elles ont aujourd'hui, les mouvements de fluides et d'ions y deviennent très lents. Les événements tectoniques de grande ampleur qui ont ensuite affecté l'ensemble du bassin de Paris, au Crétacé et au Tertiaire, n'ont pas engendré de perturbations importantes du milieu.

Le Callovo-Oxfordien est encadré par deux grandes formations calcaires, le Dogger sous-jacent et l'Oxfordien carbonaté sus-jacent, au sein desquels se trouvent des horizons sédimentaires poreux où s'écoule de l'eau. Toutefois, la perméabilité de ces horizons est faible et ils ne sont pas aquifères au sens de l'hydrogéologie (ils ne représentent pas une ressource en eau).

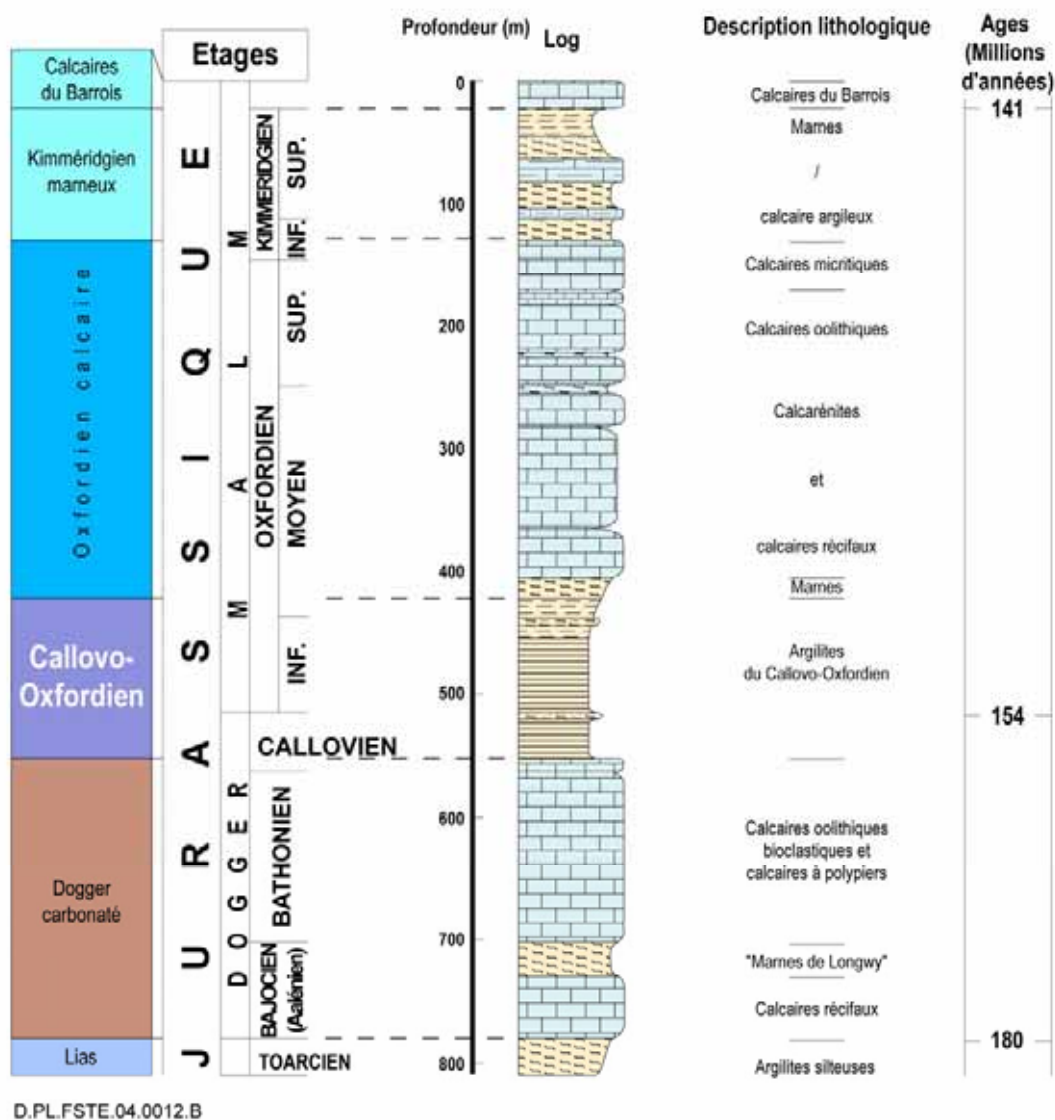


Figure 2.3.3 Coupe géologique sur le site du laboratoire de recherche souterrain

¹¹ Ces séquences expriment de faibles variations cycliques du niveau marin relatif au moment du dépôt de la couche.

2.3.2 Propriétés de la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien

Ce paragraphe présente les caractéristiques déterminantes des argilites du Callovo-Oxfordien : caractéristiques de perméabilité et de transport, géochimiques, mécaniques et thermiques. En liminaire, on notera la très grande homogénéité de la formation au travers des divers forages du secteur. Par ailleurs, les nombreuses investigations n'ont mis en évidence aucune faille au sein du Callovo-Oxfordien.

2.3.2.1 Flux d'eau, transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien

Les propriétés texturales du Callovo-Oxfordien lui confèrent une faible perméabilité sur toute son épaisseur ([6] - Tome 1). D'après les différentes mesures réalisées tant sur échantillon qu'in situ, la perméabilité est comprise entre 5.10^{-14} mètres par seconde (m/s) et 5.10^{-13} m/s.

Cette perméabilité, associée aux faibles différences de charge hydraulique de part et d'autre de la formation, impose des écoulements verticaux très faibles au sein de la couche. Elle est due à une taille des pores de la roche très petite et aux interactions entre eau porale et minéraux. De fait, la porosité contribuant à cet écoulement (porosité cinématique) correspond à la fraction d'eau libre dans la roche, soit environ la moitié de la porosité totale.

Lors du creusement d'une cavité souterraine dans la formation étudiée, le débit d'eau drainé par cette cavité est quasi nul du fait de la faible perméabilité des argilites. Tant que cette cavité est ventilée, l'eau se trouvera exclusivement sous forme de vapeur dans l'air de ventilation et n'existera pas sous forme liquide.

Les flux d'eau circulant naturellement, par convection dans la formation du Callovo-Oxfordien étant particulièrement faibles, la diffusion dans l'eau porale y est le mécanisme de transport dominant des espèces en solution.

Les petites dimensions de pores déterminent des chemins de transfert tortueux et donc, des coefficients de diffusion faibles. Ceux-ci sont relativement homogènes sur toute l'épaisseur de la couche, reflétant l'homogénéité lithologique et texturale de celle-ci. Les valeurs des coefficients de diffusion effectifs De ([6] - Tome 1) ont été évalués à :

- $De = 5.10^{-12}$ m²/s pour une porosité accessible de 5 %, dans le cas des anions ;
- $De = 2,5.10^{-10}$ m²/s pour une porosité accessible de 18 %, dans le cas des cations.

La diffusion peut être accompagnée d'autres processus. Les vitesses de déplacement des espèces en solution correspondant à ces phénomènes sont en tout état de cause très lentes et négligeables vis-à-vis de la diffusion.

Des salinités différentes de l'eau ont été observées dans le Callovo-Oxfordien et dans ses encaissants : entre 3 et 4 grammes par litre (g/l) dans l'eau interstitielle des argilites, de l'ordre de 4 g/l dans le Dogger, et 0,9 g/l dans l'Oxfordien carbonaté ([6] - Tome 1). Une forte salinité de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien indique l'absence d'échanges hydrauliques avec des formations aquifères. Elle confirme la faible perméabilité des argilites et le déplacement très lent des ions en solution.

La formation du Callovo-Oxfordien comporte des microstructures en très petit nombre, qui ont été le plus souvent colmatées par de la calcite ou de la célestine dès le début de la compaction des argilites. Les investigations menées sur le site ont montré un espacement moyen entre ces structures d'une trentaine de mètres environ dans la partie supérieure (dont le comportement est plus fragile), et hectométrique dans le reste de la couche.

Les tests hydrauliques réalisés ont indiqué que ces microstructures n'ont pas d'impact sur la perméabilité de la couche.

2.3.2.2 Géochimie du milieu

Le Callovo-Oxfordien est un milieu naturellement réducteur ; cette propriété est particulièrement favorable pour limiter la corrosion des matériaux métalliques et le relâchement des radionucléides (§ 2.2.1.2).

Pendant l'exploitation d'ouvrages souterrains, la ventilation entraînera un phénomène d'oxydation au voisinage de la paroi. Ce phénomène concernera aussi les déblais d'argilites extraits en surface. Toutefois, les argilites contiennent des minéraux (des pyrites en particulier) et des matières organiques qui réagissent avec l'oxygène, ce qui limitera ce phénomène à une très faible épaisseur.

Après la fermeture d'ouvrages souterrains, l'eau interstitielle des argilites qui percolera vers ces ouvrages pourra entraîner des ions chlorures ; l'interaction de ces ions avec les matériaux mis en place dans les ouvrages (aciers, béton) est prise en compte dans l'évaluation de leur dégradation à long terme.

Les argilites présentent aussi une forte capacité tampon vis-à-vis d'une perturbation alcaline, telle que celle qu'y induirait la dégradation progressive dans le temps d'ouvrages en béton.

2.3.2.3 Propriétés mécaniques et aptitude au creusement

La composition minéralogique des argilites du Callovo-Oxfordien leur confère une résistance relativement élevée pour une roche argileuse, un comportement peu déformable, de type endommageable à partir d'un certain seuil de charge et de type fragile à la rupture. Leur teneur importante en minéraux argileux limite le seuil de déformation réversible, atténue le comportement fragile (plasticité), tend à réduire la résistance à la rupture de la roche et lui donne un comportement visqueux (fluage à long terme) non négligeable.

Pour ce qui concerne le comportement mécanique à court terme, la résistance des argilites à la compression simple est de 21 mégapascals (MPa) en moyenne, au milieu de la formation étudiée ([6] - Tome 2)¹².

Il est à noter que cette résistance est comparable à celle de roches ayant fait l'objet de travaux souterrains importants, dans des conditions proches. On peut citer en particulier (voir Figure 2.3.4) le tunnel autoroutier de Chamoise (Savoie), qui traverse, à une profondeur d'environ 400 mètres, une roche argileuse de même âge, dont la résistance à la compression simple est de 20 à 35 MPa ([32], [33]).

Le module de déformation élastique des argilites du Callovo-Oxfordien se situe entre 3 000 et 5 000 MPa, dans la même gamme de valeurs que celui de la roche argileuse traversée par le tunnel de Chamoise (3 000 à 6 000 MPa).

¹² On notera que cette résistance n'est que légèrement inférieure à celle d'un béton de construction courant (30 MPa).



© SCETAUROUTE. Photo P.PETTIER

Figure 2.3.4 *Entrée du tunnel de Chamoise (à gauche tube en construction, au centre galerie de reconnaissance, à droite tube en exploitation)*

La résistance des argilites est à mettre en regard des contraintes mécaniques naturelles régnant dans la formation étudiée. La contrainte verticale est égale au poids des terrains, soit 12 MPa à l'emplacement du laboratoire de recherche souterrain. La contrainte horizontale majeure est en moyenne de direction nord 155° est dans le Callovo-Oxfordien, elle est légèrement supérieure à la contrainte verticale. La contrainte horizontale mineure est égale à la contrainte verticale.

Dans un tel champ de contraintes naturelles, l'ouverture d'une cavité souterraine engendre en paroi une contrainte tangentielle (c'est-à-dire parallèlement à la paroi) proche de la résistance mécanique des argilites. Aussi, le comportement de la formation étudiée se situe sur un seuil entre l'apparition, ou non, de fractures dans les argilites à proximité immédiate des ouvrages. Cet effet de seuil se traduira notamment dans la sensibilité de la réponse mécanique des argilites à la profondeur d'implantation des ouvrages. En tout état de cause, le soutènement des argilites lors de leur creusement (§ 2.2.3.2) permet d'éviter le risque de chute de bloc durant les travaux. D'autres dispositions constructives, présentées plus loin, permettent par ailleurs d'éviter que l'apparition éventuelle d'une zone fracturée n'altère les fonctions de sûreté à long terme d'un stockage.



Figure 2.3.5 *Vue de la galerie à -445m du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

Soumises à une contrainte déviatorique (c'est-à-dire non isotrope), les argilites se déforment progressivement, tendant à se rapprocher d'un état de contrainte plus isotrope. Ce mécanisme de comportement différé (fluage) est lent ; une vitesse de déformation de fluage de 10^{-3} à 10^{-4} par an a été mesurée sur des échantillons saturés en eau, au bout de deux à trois années, pour des contraintes déviatoriques constantes de 5 à 15 MPa ([6] - Tome 2)¹³ Le comportement différé des argilites se traduira par une mise en charge progressive des ouvrages souterrains. Les revêtements des excavations souterraines, puis à plus long terme l'ensemble des matériaux remplissant ces excavations, permettront de reprendre les contraintes et de maîtriser l'endommagement de la roche.

La ventilation des ouvrages souterrains entraîne une désaturation progressive des argilites à proximité : leur teneur en eau diminue, au profit de la formation d'une phase gazeuse dans les pores de la roche. La désaturation induit un accroissement de la raideur et de la résistance de la roche, et ralentit considérablement les déformations différées, voire les suspend, aussi longtemps que l'argilite reste non saturée ([6] - Tome 2).

Les niveaux supérieurs de la formation du Callovo-Oxfordien se distinguent par une plus grande résistance que le niveau médian de la formation (30 MPa en moyenne). L'endommagement y est naturellement faible, comme le montrent les observations faites dans les puits du laboratoire de recherche souterrain. Cet élément représente un atout favorable pour le scellement des puits d'une éventuelle installation de stockage.

¹³ Par comparaison, l'argile de Boom, étudiée en Belgique pour un éventuel stockage (Laboratoire souterrain Hadès, site de Mol) présente une vitesse de fluage nettement supérieure : elle varie entre 0.06 et 0.3 par an pour une contrainte déviatorique de 2,25 à 2,75 MPa [34].

2.3.2.4 Caractéristiques thermiques

La température géothermique au sein de la formation du Callovo-Oxfordien s'élève à 22 °C à la profondeur du laboratoire de recherche souterrain. L'augmentation de la température avec la profondeur est de 2,3 °C par centaine de mètres, partant d'une température à proximité de la surface du sol, stable dans le temps, de 10 °C, ce qui est faible pour le contexte français. Les cycles saisonniers ou de périodicité limitée s'amortissent en effet rapidement à faible profondeur. Seuls, les cycles climatiques montrant les périodes les plus longues (cycles glaciaires-interglaciaires de 100 000 ans) ont un impact de quelques degrés à 500 mètres ([6] - Tome 2).

Les argilites du Callovo-Oxfordien présentent des conductivités thermiques anisotropes, l'anisotropie résultant de la stratification correspondant au dépôt des sédiments. Parallèlement à la stratification, la conductivité thermique varie entre 1,9 et 2,7 watts par mètre et par degré Celsius (W/m.°C), selon la teneur en carbonate de l'horizon considéré. Orthogonalement à la stratification, la conductivité varie entre 1,3 et 1,9 W/m.°C. On notera que ces conductivités thermiques sont moyennes pour une roche ; à titre de comparaison, un granite sera plus conducteur de la chaleur, avec une conductivité de 2,5 à 4 W/m.°C [35]. Elles sont toutefois suffisantes pour permettre une évacuation de la chaleur par la roche.

Une augmentation de température des argilites n'a pas d'effet significatif sur la résistance mécanique et la déformation à court terme de la roche pour des températures inférieures à 70 °C. Elle augmente les vitesses et les amplitudes de déformation différée des argilites, hors la prise en compte des effets de désaturation ([6] - Tome 2).

2.3.3 Contexte hydrogéologique

Le schéma hydrogéologique du secteur de Meuse/Haute-Marne est caractérisé par une succession de couches géologiques, tantôt calcaires, tantôt argilo-marneuses, de propriétés hydrogéologiques contrastées et, comme indiqué plus haut, de très grandes extensions. Les formations calcaires sont aquifères dans certaines régions du Bassin de Paris, mais leur transmissivité hydraulique apparaît en général faible sur le secteur étudié ([6] - Tome 1).

À l'ouest et au sud du laboratoire, les structures tectoniques (fossé de la Marne, faille de Poissons et autres failles de moindre importance) peuvent être profondément enracinées dans le socle hercynien, et présentent probablement des zones broyées qui localement facilitent les circulations d'eau.

Le fossé de Gondrecourt, plus récent, a eu des mouvements en décrochement et en extension, qui ont pu également faciliter des circulations de fluides, mais l'orientation actuelle des contraintes aurait plutôt tendance à fermer les failles le constituant.

Dans les calcaires du Barrois (Tithonien) constituant la surface du plateau, les écoulements sont majoritairement localisés dans le réseau karstique¹⁴, qui s'étend essentiellement dans sa partie supérieure, le long de la vallée de la Marne vers le nord-ouest sur plusieurs dizaines de kilomètres, avec des vitesses pouvant être importantes (plus de dix kilomètres par an). Ils sont isolés des formations sous-jacentes notamment par l'épaisse couche argilo-marneuse du Kimméridgien de 140 mètres d'épaisseur. Les principaux exutoires naturels sont les sources situées dans la vallée de la Saulx et de l'Ornain.

L'Oxfordien calcaire est constitué d'une succession verticale d'horizons de perméabilité comprise entre $3 \cdot 10^{-12}$ et 10^{-8} m/s ([6] - Tome 1). La recharge en eau de cette formation se fait principalement par les affleurements à l'est et au sud du site (à une distance de l'ordre de 6 km du laboratoire de Meuse/Haute-Marne).

Dans l'Oxfordien calcaire, le gradient de charge horizontal est limité sur le secteur étudié, de l'ordre de quelques pour mille. Il en résulte que le flux et la vitesse de l'eau circulant horizontalement sont faibles. Au total, l'Oxfordien ne représente pas localement une ressource en eau.

¹⁴ Réseau karstique : ensemble de cavités de taille très variable et galeries souterraines naturelles affectant les pays calcaires et créées lors de la dissolution des roches par les eaux météoriques chargées en gaz carbonique.

Dans le Dogger, les tests en forage ont montré une faible perméabilité (10^{-8} m/s dans les niveaux les plus producteurs). Aucun niveau producteur d'extension régionale n'a été identifié. La recharge s'effectue principalement par les affleurements à l'est du site, à une trentaine de kilomètres. Il n'existe pas d'exutoire naturel à cette formation sur le secteur étudié.

2.3.4 Evolution géoprospective

L'évolution à long terme du milieu géologique, comme son évolution passée à l'échelle des temps géologiques, résulte d'une part du climat à la surface du sol, d'autre part de l'évolution géodynamique interne des plaques formant la croûte terrestre.

2.3.4.1 Évolution climatique et conséquence

Depuis le début de l'ère quaternaire, les cycles climatiques se succèdent de façon oscillante, en fonction des paramètres astronomiques, avec une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires. Périodiquement les terrains de surface sont gelés de façon durable sur une épaisseur significative (pergélisol) sur le site Meuse/Haute-Marne (40 à 50 % du temps au cours des derniers 130 000 ans). La pénétration du gel en profondeur est de l'ordre de la centaine de mètres. La formation du Callovo-Oxfordien, plus profonde, n'est pas directement affectée par le gel ([6] - Tome 3). Nonobstant l'influence de l'effet de serre qui pourrait ralentir cette évolution, un pergélisol pourrait apparaître dans une centaine de milliers d'années.

La conséquence de ces cycles climatiques est une reprise périodique de l'érosion en surface. Les principaux phénomènes érosifs sont l'incision des vallées et le dégagement des plateaux calcaires, qui modifient les écoulements de surface par l'évolution des réseaux karstiques et de possibles captures de rivières.

Ces phénomènes ont laissé des traces dans le paysage (terrasses alluviales par exemple) qui permettent d'estimer leur vitesse. Le site du laboratoire se trouve sur une zone de plateau à l'écart des vallées majeures, située en tête d'un réseau hydrographique secondaire, où l'érosion est moins rapide. Une disparition progressive des calcaires du Barrois est possible au-delà de 500 000 ans.

2.3.4.2 Stabilité géodynamique à long terme

Les seuls mouvements tectoniques envisagés sont limités aux failles régionales (failles de la Marne à l'ouest, fossé de Gondrecourt-le-Château au sud-est). Hors de ces zones, aucune déformation des couches géologiques ne semble envisageable ([6] - Tome 3). La grande stabilité géodynamique de la région explique le caractère pratiquement asismique du secteur à l'échelle des temps historiques.

2.3.4.3 Aléa sismique

Aucun séisme de magnitude supérieure à 3,5 n'a été relaté ou identifié dans la zone proche du secteur Meuse/Haute-Marne (le plateau des calcaires du Barrois entre la vallée de la Marne et celle de la Meuse) par des témoignages historiques ou des enregistrements plus récents. Les séismes historiques connus les plus proches sont situés à plus de 60 kilomètres du site (essentiellement dans les Vosges) et présentent une magnitude comprise entre 3 et 6.

Pour le dimensionnement des ouvrages, conformément à la réglementation, un séisme maximum de sécurité (SMS) peut être défini pour la période d'exploitation du stockage. La magnitude de ce séisme (magnitude de 6 à 25 km du site) est déterminée de façon conservatrice en majorant celle du plus fort séisme historique connu dans la zone et en déplaçant le foyer de son lieu d'occurrence au plus proche du site. Ce séisme est caractérisé par une accélération maximale à la profondeur du stockage d'environ $0,15$ g (soit $1,5$ m/s²) et en surface d'environ $0,2$ g (soit 2 m/s²), différence liée à l'amplification du mouvement lors de la propagation des ondes sismiques en surface ([6] - Tome 3, [36]).

Pour évaluer l'impact d'un séisme à très long terme, on détermine quel serait le séisme maximum physiquement possible (SMPP) pour la configuration des failles les plus proches du site, en les supposant actives (longueur, profondeur d'enracinement, segmentation). Les simulations actuelles

donnent à ce séisme une magnitude de 6,1 à 6 kilomètres du site du laboratoire et à une profondeur d'environ 12 kilomètres. Un tel séisme induirait une accélération maximale à la profondeur d'un stockage d'environ 0,3 g ([6] - Tome 3, [36]).

Bien que les caractéristiques des SMS et SMPP soient fixées comme très majorantes, elles restent, par comparaison, d'amplitude modérée par rapport à celles de séismes se produisant actuellement sur le pourtour de la mer Méditerranée.

2.4 Principes de conception de l'architecture du stockage

Une installation de stockage serait constituée d'alvéoles (des cavités souterraines) creusées dans la formation d'argilites, et contenant les colis de stockage. Ces derniers sont constitués des colis primaires tels que conditionnés par les producteurs de déchets complétés par un complément de colisage en fonction des besoins du stockage.

L'architecture étudiée regroupe les alvéoles de stockage des différentes catégories de déchets au sein de zones de stockage spécifiques. Les zones de stockage de déchets B, de déchets C et, le cas échéant, de combustibles usés sont ainsi physiquement distinctes les unes des autres. Cette disposition est envisagée pour offrir une indépendance en matière (i) de gestion des différents déchets (ii) et de comportement de chaque zone, au regard des caractéristiques propres des déchets qu'elle contient [37]. L'ordre de grandeur de l'emprise souterraine de la zone de stockage de déchets B est de 100 hectares, pour l'inventaire présenté au chapitre 3. Pour les déchets C (et le cas échéant les combustibles usés), l'emprise dépend des scénarios étudiés, et de la durée de leur entreposage avant stockage. En effet, l'entreposage préalable permet de diminuer la puissance thermique des déchets au moment de leur stockage et contribue donc à réduire l'emprise des installations souterraines correspondantes. Ainsi, dans l'hypothèse d'une durée d'entreposage préalable de 60 à 70 ans pour les déchets C (selon les types de colis), la zone de stockage correspondante présente une emprise de 500 hectares dans un scénario de retraitement du combustible UOX et MOX (voir chapitre 6).

Pour la construction des alvéoles, la mise en stockage des déchets, et la gestion réversible des installations, l'accès s'effectue par des puits verticaux entre la surface et le niveau de stockage, puis par des galeries de liaison entre ces puits et les zones de stockage. En cherchant à limiter le nombre de ces ouvrages, quatre puits verticaux permettent d'assurer l'ensemble des fonctions présentées à la section 2.1.4. Ces puits peuvent être communs à l'ensemble des déchets stockés.

Pendant la phase d'exploitation, des installations de surface assurent la réception des déchets et la préparation des colis de stockage. Elles comportent aussi des ateliers et bureaux en soutien aux travaux souterrains et à l'exploitation. Une zone spécifique (appelée verse) permet de stocker les déblais de creusement. Son emprise dépend du volume des déblais et des hypothèses retenues pour sa géométrie ; elle pourrait être de l'ordre de 100 hectares pour un scénario de retraitement des combustibles (UOX et MOX).

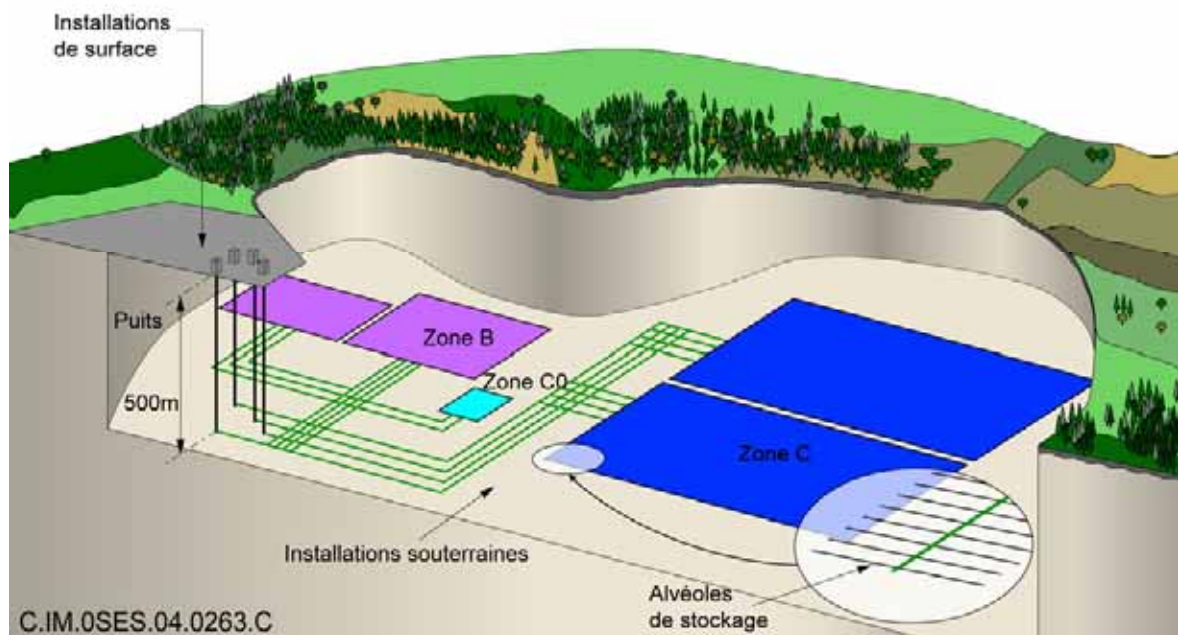


Figure 2.4.1 Vue d'une architecture de stockage en cours d'exploitation

La conception des installations de surface est similaire à des installations industrielles existantes (voir le chapitre 8 pour davantage de détails).

Les installations souterraines et les colis de stockage constituent des éléments plus spécifiques. Après une présentation d'éléments clés qui président à leur conception, les sections suivantes décrivent de manière synthétique les options proposées pour les alvéoles et les colis de stockage de chaque catégorie de déchets, puis un agencement possible des zones de stockage et des puits et galeries de liaison.

2.4.1 Éléments clés de la conception des installations souterraines et des colis de stockage

Les options techniques proposées pour la conception des installations souterraines et des colis de stockage répondent à trois besoins exprimés plus haut :

- les fonctions de sûreté à long terme ;
- la réversibilité et la souplesse d'exploitation ;
- la sécurité et la sûreté de l'exploitation.

À ces besoins s'ajoute une recherche de compacité.

2.4.1.1 Conception et sûreté à long terme.

La maîtrise des circulations d'eau, du relâchement des radionucléides, de leur migration vers l'environnement, et des perturbations induites par le stockage, conduit à adopter plusieurs dispositions d'architecture structurantes.

● Un positionnement du stockage au milieu de la formation géologique

Les installations souterraines sont implantées dans la formation géologique de manière à mobiliser ses propriétés favorables pour constituer une barrière à la circulation de l'eau et à la migration des radionucléides. Afin de maximiser les épaisseurs d'argilites situées au-dessus comme au-dessous du stockage, il est envisagé des installations souterraines de faible extension verticale, organisées sur un seul niveau situé au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien. Le tracé de ces installations souterraines peut être globalement adapté au pendage de la couche, jusqu'à 1.5° ¹⁵ ([6] - Tome 1).

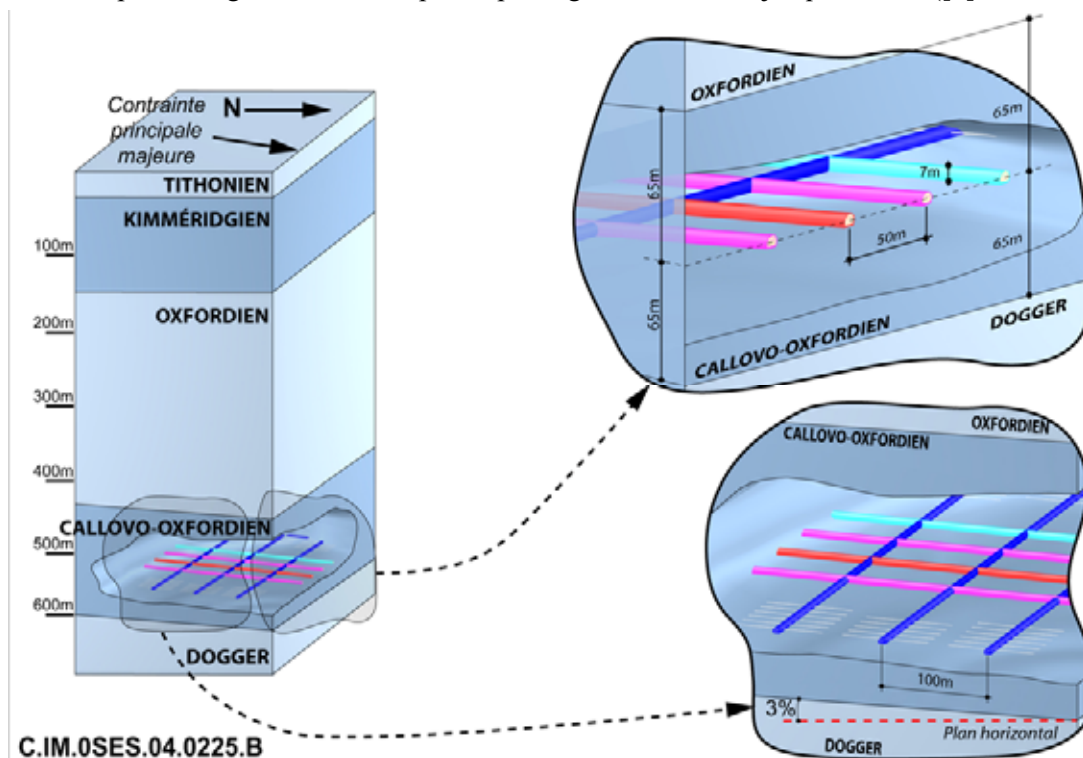


Figure 2.4.2 Positionnement du stockage dans la couche. Les profondeur et épaisseur de la formation argileuse correspondent, à titre illustratif, à l'emplacement du laboratoire de recherche souterrain.

● Des ouvrages limitant les perturbations mécaniques du milieu

Les ouvrages souterrains sont conçus de manière à limiter les perturbations géomécaniques d'une part pendant la construction et l'exploitation, et d'autre part après la fermeture du stockage (Cf. § 2.2.1.4).

Le profil courant des différents ouvrages souterrains (alvéoles de stockage et galeries d'accès) est en général circulaire ou pseudo circulaire¹⁶. Leur diamètre excavé est limité au regard des connaissances sur l'argilite et de l'expérience de travaux souterrains comparables. Un revêtement est conçu pour assurer un soutien mécanique durable. Par ailleurs, suivant un usage fréquent en travaux souterrains, une distance entre deux ouvrages adjacents d'au moins cinq fois leur diamètre a été retenue pour favoriser leur stabilité mécanique.

Le remblaiement des galeries d'accès à l'issue de leur exploitation contribue à assurer un taux de vide résiduel limité. Une telle mesure évite la création d'éventuels dommages mécaniques dans les argilites à très long terme, après la perte de l'intégrité des revêtements [38].

¹⁵ Soit une pente d'environ 3 %

¹⁶ Dans un champ de contraintes isotrope, une section circulaire représente la configuration la plus stable et la moins perturbatrice pour un ouvrage souterrain.

● **Un dimensionnement limitant les perturbations thermiques**

La configuration géométrique des installations souterraines est conçue pour limiter la température dans le stockage. Concrètement, on a retenu de limiter la température à 90 °C au contact de la roche (ou de la barrière ouvragée lorsque le concept en comporte une). Les concepts étudiés reposent sur une dissipation de la chaleur par conduction dans la roche. Dans ce cadre, les paramètres essentiels de dimensionnement sont le nombre de colis de stockage par alvéole et l'écartement des alvéoles entre elles. L'emprise des zones de stockage de déchets C vitrifiés et de combustibles usés, en fonction de la puissance thermique dégagée par les colis lors de leur mise en stockage, résulte ainsi directement de considérations thermiques.

Par ailleurs, on a retenu d'éloigner les déchets B, en particulier les déchets bitumés, des déchets exothermiques afin de les protéger de la chaleur.

● **Un scellement multiple des installations souterraines et une architecture en cul de sac**

Lors de la fermeture du stockage, les alvéoles, les galeries de liaison et les puits doivent être scellés. Pour ce faire, on utilise des bouchons à base d'argile gonflante de faible perméabilité. Ces scellements s'opposent aux circulations d'eau le long de ces ouvrages. Ils limitent le débit d'eau, ainsi que la vitesse de circulation de cette eau.

Des dispositifs particuliers ont été étudiés pour assurer la continuité de l'étanchéité entre le bouchon et les argilites, et pour interrompre, le cas échéant, la zone d'argilite qui aurait été fracturée au voisinage immédiat de l'excavation (voir la section 7.5).

Pour favoriser l'efficacité de ces scellements, il a été retenu d'orienter les alvéoles et les tronçons de galeries destinées à être scellés, parallèlement à la contrainte géomécanique principale majeure. Une telle disposition permet de placer l'ouvrage dans un champ de contraintes mécaniques isotrope, et réduit l'ampleur de la zone d'argilite endommagée au voisinage [38]. L'Andra a aussi cherché à minimiser la section des ouvrages à sceller. En effet, l'extension de la zone endommagée, et en particulier celle de la partie fracturée, le cas échéant, sont d'autant plus importantes que ce diamètre est grand. Le diamètre excavé des galeries de liaison a été limité à environ sept mètres ce qui reste compatible avec les flux d'équipements, de matériaux et de ventilation devant transiter par ces galeries (voir le chapitre 7).

Par ailleurs, pour limiter les possibilités de phénomènes de convection dans le stockage, notamment en situation de défaillance d'un scellement, il a été retenu de placer tous les éléments d'architecture en *cul-de-sac*. Cette disposition concerne particulièrement le flux d'eau susceptible de provenir des formations sus-jacentes. Elle évite que, sous l'effet d'un gradient de charge horizontal une circulation ne puisse s'établir à travers le stockage.

A cet égard l'architecture présentée est caractérisée par les dispositions suivantes :

- les alvéoles de stockage décrites plus loin sont des tunnels « borgnes » ;
- les groupes d'alvéoles ont une topologie en « cul de sac ». L'accès à un ensemble d'alvéoles est ainsi réalisé par un petit nombre de galeries parallèles et proches les unes des autres comme le montre la Figure 2.4.3 ;
- le stockage est lui-même globalement en cul-de-sac, tous les puits étant groupés d'un seul côté du stockage, dans une même zone.

Ainsi, les scellements multiples et la possibilité d'une architecture en cul-de-sac complètent les caractéristiques hydrogéologiques favorables du site (faible perméabilité de la formation étudiée, faibles gradients de charge dans cette formation et dans les formations sus-jacentes) pour limiter de manière particulièrement robuste les débits et la vitesse de l'eau au sein du stockage.

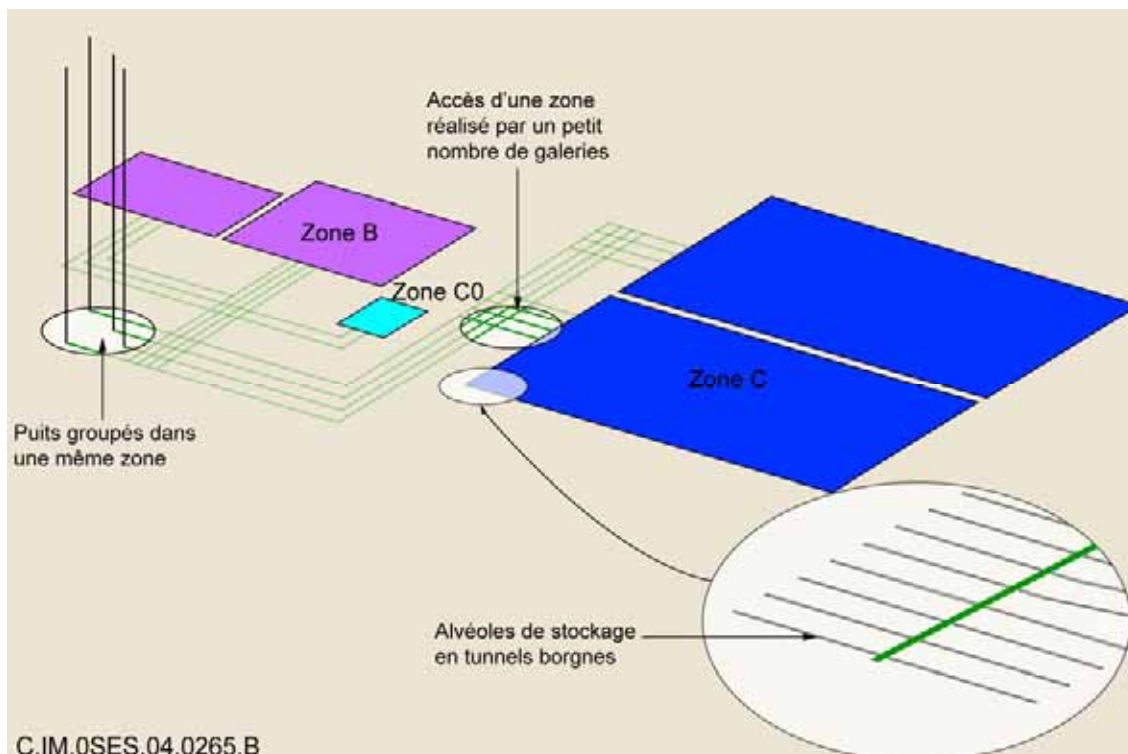


Figure 2.4.3 Principe d'un ensemble d'alvéoles en cul-de-sac

- **Un environnement physico-chimique favorable pour les déchets**

La conception des alvéoles de stockage, en particulier le choix des matériaux constitutifs, vise à offrir un environnement physico-chimique favorable aux colis de déchets. Il s'agit de maîtriser leur altération dans le temps, afin de limiter le relâchement d'éléments radioactifs en présence d'eau [9].

À cet égard, le béton envisagé pour les alvéoles de déchets B est un matériau favorable à la protection physico-chimique des déchets et à la rétention de certains radionucléides.

Dans le cas des déchets C vitrifiés, l'usage du béton n'est pas envisagé au voisinage des colis, car les conditions alcalines qu'il créerait pourraient accélérer l'altération du verre. Seuls des matériaux métalliques ont été considérés.

- **Un fractionnement du stockage**

Les zones de stockage sont compartimentées pour réduire la quantité de déchets et de radionucléides qui pourraient être affectés dans une situation de défaillance ou d'intrusion. À cet égard chaque module de stockage, constitué d'une alvéole ou d'un groupe d'alvéoles, peut être rendu indépendant des autres par une distance horizontale suffisante entre modules et par des scellements fermant les galeries d'accès ou de liaison.

2.4.1.2 Conception, réversibilité et souplesse d'exploitation

La prise en compte du principe de réversibilité et la recherche d'une conception réaliste d'un point de vue industriel d'une installation destinée à être gérée pendant une durée d'ordre séculaire conduisent à offrir à l'exploitant du stockage une souplesse de gestion adaptative.

- **Une modularité des installations souterraines**

La modularité des architectures permet une gestion souple des installations. Elle donne notamment une capacité d'action sur le processus de stockage (construction et exploitation par phases) et autorise une évolution de la conception et de la méthode d'exploitation en fonction du retour d'expérience.

À cet égard chaque zone de stockage peut être construite et exploitée progressivement en groupes successifs d'alvéoles. La durée de construction de ces groupes d'ouvrages et de leur remplissage par les colis de déchets est de l'ordre de quelques années (en général entre deux et quatre années selon les hypothèses considérées sur les flux de colis).

- **Des ouvrages et des colis de stockage durables**

La réversibilité conduit à privilégier des matériaux et des dispositions de conception favorisant la durabilité des ouvrages et des colis de stockage.

- **Une mise en place des colis favorisant la récupérabilité**

La conception des moyens et des procédés de stockage des colis vise à faciliter les opérations de récupération de colis éventuellement décidées par les générations futures. Elle privilégie notamment l'utilisation de moyens similaires à ceux de leur mise en place. Elle conduit à ménager des jeux de manutention entre colis et/ou entre colis et parois de l'alvéole, pouvant être maintenus durablement. Ces jeux sont cependant minimisés au regard de la limitation des perturbations géomécaniques comme indiqué plus haut.

2.4.1.3 Conception, sécurité et sûreté d'exploitation

Les considérations de sûreté d'exploitation visent à offrir à l'exploitant du stockage une stratégie et des techniques sûres pour la mise en œuvre des activités de construction, de transfert des colis de déchets jusqu'à leur emplacement de stockage, ainsi que de fermeture des installations souterraines.

Elles constituent une donnée importante de la conception des galeries d'accès. Elles président, aussi, à la conception des équipements et procédés de transfert et mise en alvéole des colis.

- **Gestion de la coactivité**

La possibilité de construire les modules de stockage au fur et à mesure de l'exploitation induit la simultanéité d'une activité de type nucléaire (exploitation) et d'une activité de type génie civil (construction). Pour éviter des interférences entre ces deux activités caractérisées par des flux de matériaux et des risques de natures différentes, la conception retient des galeries spécifiques par type d'activité. Cette spécialisation des galeries permet la séparation des flux de ventilation, de véhicules, de matériaux et de personnes. De même, la réalisation des zones de stockage par sous-ensembles successifs d'alvéoles permet de mener, à un instant donné, une seule activité au sein de chaque sous-ensemble.

- **Des colis de stockage standardisés**

La conception de colis de stockage vise à faciliter leur gestion, et en particulier à standardiser leur manutention en s'affranchissant de la grande diversité des colis primaires qu'ils contiennent, en particulier dans le cas des déchets B. Cette standardisation réduit le nombre d'équipements de manutention et rend de ce fait le processus d'exploitation plus simple et plus sûr. Cela permet de limiter le nombre de colis de stockage à mettre en alvéole à environ deux à dix colis de stockage par jour, toutes catégories de déchets confondues, selon les scénarios et hypothèses de flux de colis primaires.

- **Un transfert des colis de stockage sous protection radiologique**

Les colis de stockage du fait de leur caractère irradiant, sont transférés depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage au moyen de dispositifs assurant la radioprotection du

personnel (hottes blindées). Des systèmes d'accostage installés en tête d'alvéole garantissent la continuité de la protection biologique du personnel lors des opérations de mise en alvéole de stockage.

2.4.1.4 Recherche de compacité pour les installations souterraines

La conception et le dimensionnement des installations souterraines sont conduits dans un souci de maîtrise du volume total excavé et de l'emprise surfacique du stockage. La compacité du stockage résulte d'un compromis entre les contraintes thermiques et géotechniques (qui privilégient des petits ouvrages espacés), les contraintes technologiques de mise en alvéole (qui limitent la longueur de ces dernières) ainsi que la recherche d'un fractionnement du stockage.

La compacité est motivée par :

- une réduction du volume excavé, limitant le coût de mise en œuvre, ainsi que le volume de déblais à stocker en surface ;,
- l'utilisation optimale de l'emprise souterraine dans le Callovo-Oxfordien ;
- une simplification du réseau de galeries, facilitant l'exploitation.

Elle a conduit, pour les déchets B, à retenir le principe de chambres de stockage irradiantes de géométrie simple, et pour les déchets C et combustibles usés, à privilégier des alvéoles horizontales, en tunnels.

2.4.2 Les colis de stockage et la conception des alvéoles de stockage

2.4.2.1 Les colis de stockage et alvéoles pour déchets B

La catégorie des déchets B recouvre une grande diversité de colis primaires en termes de conditionnement, de géométrie et de contenu radiologique et chimique.

Le souci de simplifier les méthodes d'exploitation a conduit à la conception de colis de stockage standardisés, regroupant un à quatre colis primaires dans une enveloppe en béton parallélépipédique d'une masse comprise entre 6 et 25 tonnes environ, et de dimensions comprises entre 1,2 et 3 mètres – voir la section 4.1 pour plus de détail. La protection biologique n'est pas incorporée à l'enveloppe, car elle nécessiterait une épaisseur de béton supplémentaire néfaste à la recherche de compacité. Une contribution du béton des colis de stockage à la limitation du relâchement des radionucléides à long terme a été étudiée à titre exploratoire.

Les alvéoles de stockage sont des tunnels subhorizontaux, de longueur limitée à environ 270 mètres – une description détaillée figure à la section 5.1. Les colis B étant non ou peu exothermiques, le diamètre excavé des alvéoles est essentiellement le résultat de l'analyse géotechnique et de la recherche de compacité. Il est limité à 12 mètres au plus.

Le revêtement de la galerie, constitué de béton, assure la stabilité mécanique de l'ouvrage. Retenu d'abord pour ses qualités mécaniques et sa durabilité favorables à la réversibilité, le béton du revêtement exerce aussi une fonction de protection chimique des colis et contribue à la rétention de radionucléides. Sa section intérieure est de forme rectangulaire et délimite une chambre de stockage dans laquelle les colis sont empilés sur plusieurs niveaux.

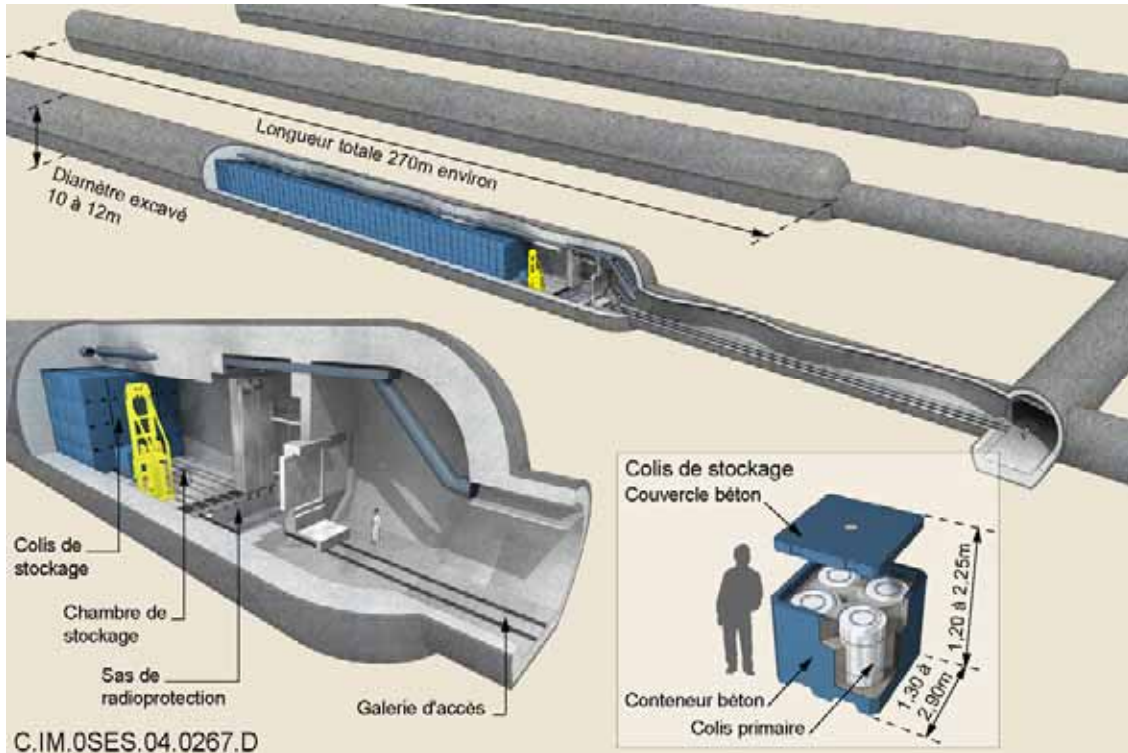


Figure 2.4.4 Alvéole de stockage de déchets B en exploitation

La chambre de stockage constitue un volume irradiant dans lequel les colis sont manutentionnés par un équipement téléopéré, décrit au chapitre 9. La tête des alvéoles est équipée d'un sas de radioprotection permettant l'extraction des colis de stockage contenus dans les hottes blindées, et la protection radiologique des opérateurs susceptibles d'être présents dans la galerie d'accès.

Lors de la fermeture de l'alvéole, il n'apparaît pas nécessaire de combler les jeux entre colis dans la chambre de stockage, ce qui facilite les opérations de fermeture et la récupération éventuelle des colis ; les techniques de mise en place et de récupération permettent en effet de limiter ces jeux à 5 % du volume de la chambre. En revanche, le volume occupé par le sas de radioprotection est rempli ; la galerie d'accès est scellée par un bouchon en argile gonflante. Chaque alvéole de déchets B constitue à long terme un module isolé des autres.

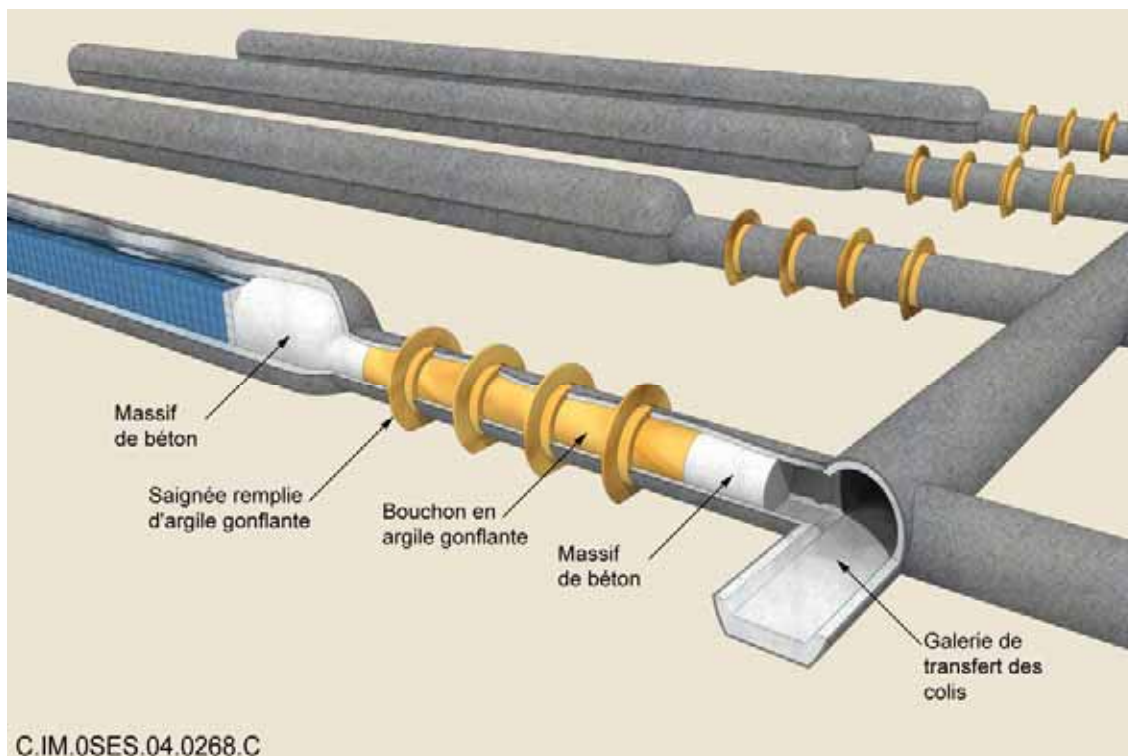


Figure 2.4.5 Alvéole de stockage de déchets B scellée

2.4.2.2 Les colis de stockage et alvéoles pour déchets C vitrifiés

Pour interdire l'arrivée d'eau sur les déchets pendant la phase thermique, chaque colis primaire de déchets vitrifiés est placé dans un surconteneur étanche à l'eau durant toute cette phase. Celui-ci est constitué d'acier non allié, dont l'épaisseur utile de 55 millimètres est dimensionnée de manière très conservatrice pour résister à la corrosion sur une durée millénaire ; une description détaillée du surconteneur est donnée à la section 4.2. Le colis de stockage standard a une masse proche de 2 tonnes (cas des colis types C1 à C4).

La conception des alvéoles de stockage des déchets C résulte (i) de la recherche d'un environnement physico-chimique adapté aux colis (ii) du dimensionnement thermique associé à une dissipation de la chaleur par conduction dans la roche ; ce dernier conduit à limiter la charge thermique par unité de surface, non seulement à l'échelle du stockage mais également à celle de l'alvéole.

Les alvéoles de stockage des déchets C sont des forages horizontaux borgnes, d'environ 0,7 mètre de diamètre excavé. Leur longueur a été limitée à ce stade à environ 40 mètres, longueur considérée comme raisonnable au regard des techniques de construction et de manutention - voir la section 5.2. Ils sont revêtus d'un chemisage métallique qui soutient les argilites et qui permet la manutention des colis tant pour leur mise en place que leur récupération éventuelle. Ils contiennent une unique rangée de 5 à 18 colis de stockage.

Les colis caractérisés par une puissance thermique modérée peuvent être stockés côte à côte, c'est le cas des colis types C0.

Pour les colis de plus forte puissance thermique (colis type C1 à C4), on a déterminé une durée d'entreposage envisageable avant une mise en stockage, afin de limiter les perturbations thermiques. Cette durée est de 60 à 70 ans selon les colis. Après une telle durée d'entreposage, la puissance thermique résiduelle de ces colis nécessite encore de les séparer par des intercalaires, dans une même alvéole de stockage. En tout état de cause, on n'a pas conduit à ce stade de processus d'optimisation.

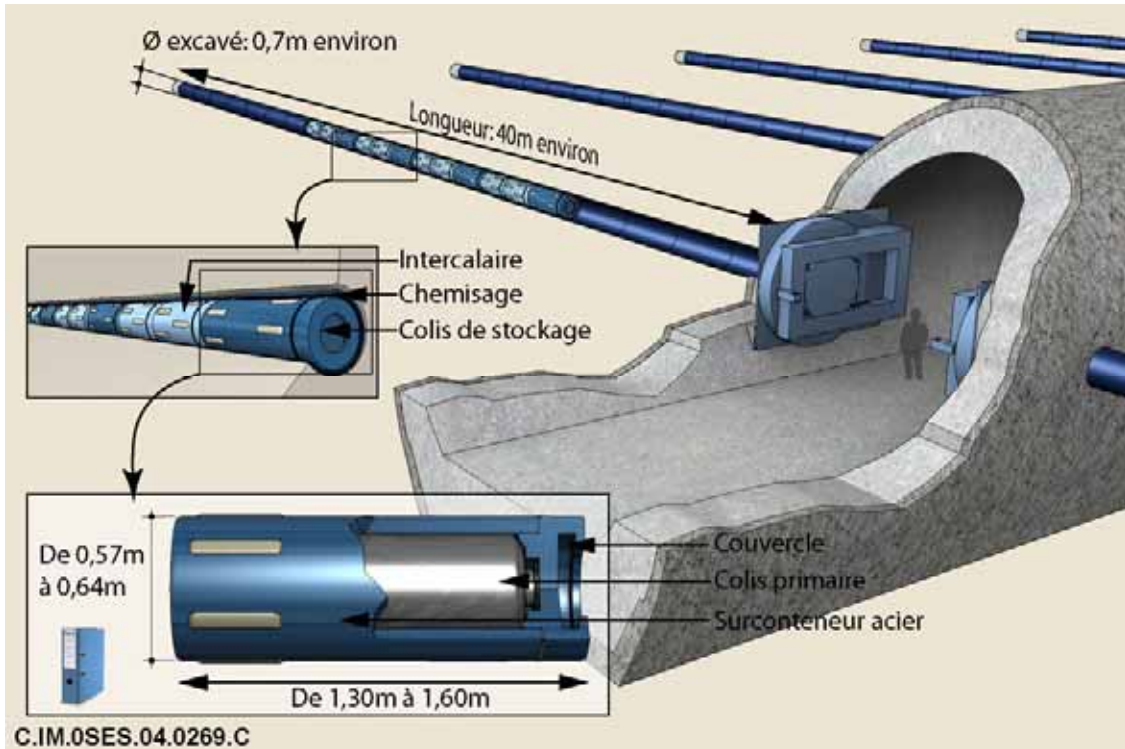


Figure 2.4.6 Alvéole de stockage de déchets C vitrifiés

Lors de sa fermeture l'alvéole est scellée par un bouchon d'argile gonflante maintenu mécaniquement par un massif d'appui en béton.

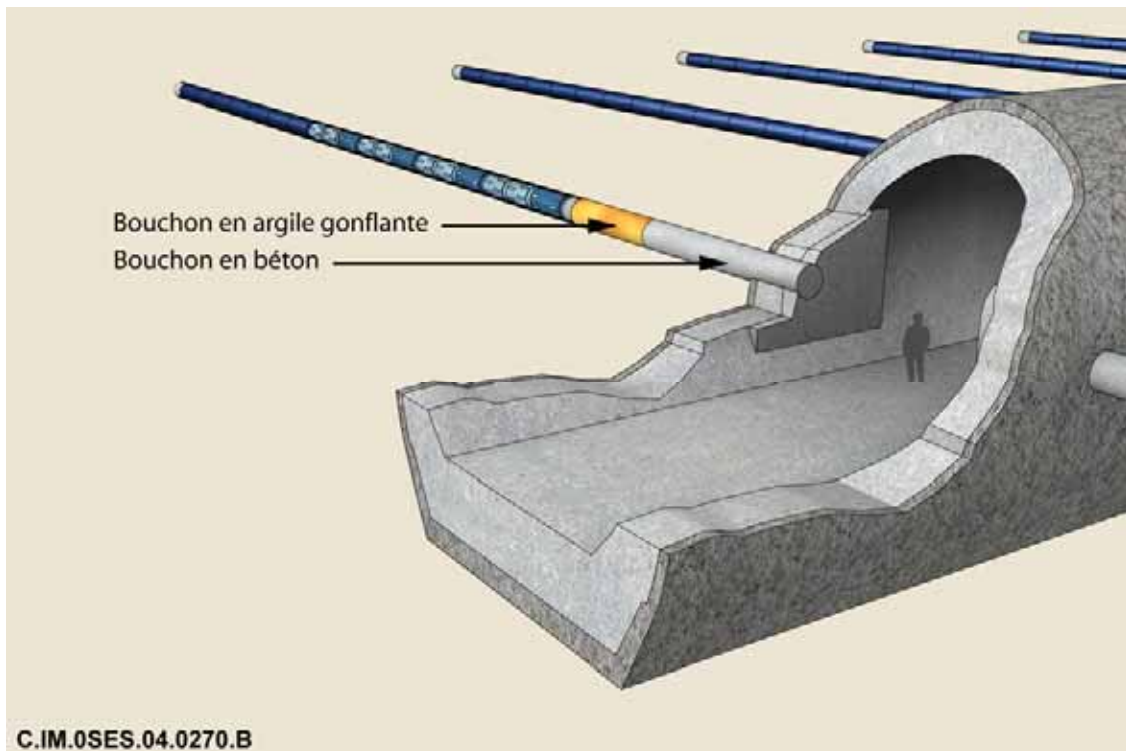


Figure 2.4.7 Alvéole de stockage de déchets C scellée

2.4.2.3 Les colis de stockage et alvéoles pour combustibles usés

Les colis de stockage étudiés pour les combustibles usés comprennent une enveloppe cylindrique en acier non allié. L'épaisseur de cette enveloppe doit assurer une étanchéité durant la phase thermique. Pour les combustibles déchargés des réacteurs électrogènes à eau pressurisée (REP), de types CU1 (UOX) et CU2 (MOX), on a retenu une durée d'étanchéité à minima de l'ordre de 10 000 ans. L'épaisseur a été déterminée de manière conservative (environ 110 mm pour le conteneur CU1).

Le nombre d'assemblages dans chaque colis dépend du type de combustible utilisé, et, en particulier, de son dégagement thermique – voir la section 4.3. Pour les combustibles REP, les colis étudiés contiennent un (cas des MOX – colis type CU2) ou quatre assemblages (cas des UOX – colis type CU1). La conception du colis de stockage assure de plus la maîtrise du risque de criticité aux différentes échelles de temps. La Figure 2.4.8 illustre le plus grand colis de stockage étudié (43 tonnes, diamètre extérieur 1,3 mètre environ, longueur 5,4 mètres).

À l'instar des alvéoles de déchets C, la conception d'alvéoles pour combustibles usés est subordonnée au dimensionnement thermique. Ces alvéoles sont des tunnels horizontaux de l'ordre de 45 mètres de long contenant une unique rangée de colis de stockage – voir la section 5.3 –. Dans le cas des combustibles REP présentant un dégagement thermique élevé (1 000 à 1 500 watts par colis après un entreposage préalable avant stockage de 60 à 90 ans), les colis de stockage sont espacés les uns des autres par des intercalaires, et leur nombre est de trois à quatre par tunnel.

Pour l'étude d'alvéoles de stockage de combustibles usés REP, il a été retenu d'interposer, entre les colis et la formation géologique, un tampon (barrière ouvragée) à base d'argile gonflante. L'objectif est de se prémunir des incertitudes sur le comportement thermomécanique de l'alvéole, induites par une décroissance relativement lente du dégagement thermique des combustibles usés. Lorsque l'eau aura resaturé l'alvéole, cette option permet de constituer autour des colis un milieu continu de faible perméabilité, en mobilisant la capacité de certaines argiles à gonfler fortement en présence d'eau, et à accepter un taux de déformation élevé. Cette barrière limitera, localement, le transport des espèces dissoutes, et favorisera ainsi la maîtrise de l'environnement physico-chimique du combustible. Elle permet de gérer les incertitudes existant à ce stade sur l'évolution thermo-hydro-mécanique des argilites situées à proximité durant la phase thermique. Le diamètre excavé de l'alvéole correspondant à cette configuration est de l'ordre de trois mètres. La barrière ouvragée à base d'argile gonflante est pourvue d'un chemisage interne en position axiale qui permet l'introduction et le retrait éventuel des colis.

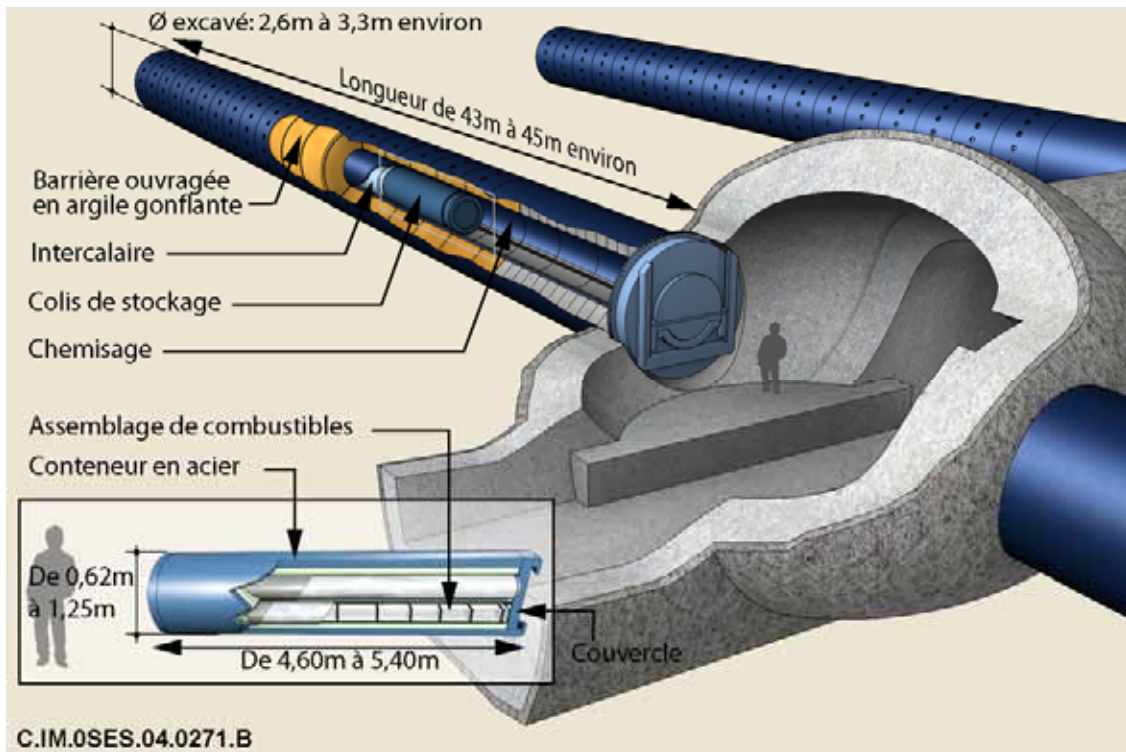


Figure 2.4.8 Alvéole de stockage de combustible usé (UOX ou MOX) en cours d'exploitation

La fermeture des alvéoles de combustible usé est réalisée par la mise en place d'un bouchon d'argile gonflante, maintenue par un massif de béton.

Pour des combustibles usés qui présenteraient un dégagement thermique plus modéré (combustibles types CU3), les colis et les alvéoles de stockage seraient similaires à ceux présentés ci-dessus pour les déchets C vitrifiés.

On notera que l'étude d'une barrière ouvragée à base d'argile gonflante pour les combustibles usés REP serait transposable aux déchets C (et aux combustibles types CU3).

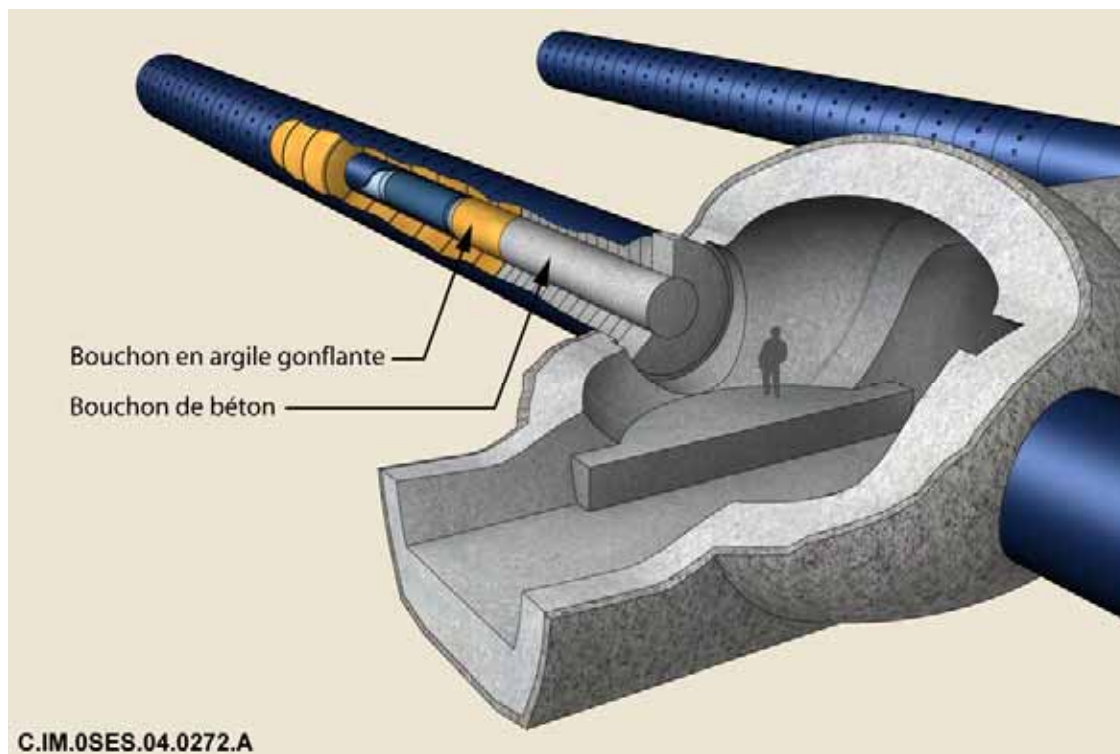


Figure 2.4.9 Alvéole de stockage de combustible usé scellée

2.4.3 La configuration d'ensemble des installations souterraines

Les alvéoles de stockage des différentes catégories de déchets sont organisées dans une architecture d'ensemble. Cette dernière comprend différents niveaux, constitués par (i) les zones indépendantes de stockage des différentes catégories de déchets (ii) des groupes d'alvéoles de stockage traduisant la réalisation progressive de ces zones (iii) les alvéoles de stockage proprement dites.

De plus, l'architecture comprend des puits et des galeries de liaison : ces ouvrages assurent l'accès aux modules de stockage, pour en permettre, d'abord, la construction, puis l'amenée des colis de déchets, l'observation et le cas échéant la fermeture.

2.4.3.1 Les puits et galeries de liaison

Un ensemble de quatre puits permet d'assurer la liaison entre les installations de surface et le niveau du stockage, dans la formation géologique étudiée (ces puits sont décrits en détail au chapitre 7) :

- un puits de personnel, affecté aux transferts de personnel et de petits matériels, ainsi qu'à l'amenée d'air frais dans les installations souterraines ;
- un puits de travaux affecté aux transferts des déblais, des remblais, des autres matériaux et des équipements. Ce puits constitue aussi une entrée d'air ;
- un puits spécifiquement affecté au transfert des colis de stockage (placés dans des « hottes » de protection contre le rayonnement) et des hottes vides ;
- un puits de retour de l'air extrait des installations souterraines.

En variante, une descenderie est envisageable pour assurer des fonctions de service, de secours, ou le transfert de colis.

Les modules de stockage sont accessibles depuis les puits par des galeries de liaison, qui forment un ensemble hiérarchisé. Pour permettre la coexistence, en toute sécurité, d'activités de mise en stockage de colis de déchets, et de construction de nouveaux modules, les galeries de liaison sont spécialisées par fonctions :

- certaines galeries de liaison desservent les chantiers de construction (elles sont équipées de voies ferrées ou de pistes pour engins sur pneus) ; elles permettent le transfert des personnels de chantier, des équipements miniers, des déblais et des matériaux de construction ;
- d'autres galeries sont utilisées pour le transfert des colis de stockage ;
- enfin des galeries sont spécifiquement affectées au retour d'air de la ventilation.

Lorsque, le cas échéant, leur fermeture est décidée, les galeries de liaison et les puits sont scellés.

2.4.3.2 Les zones de stockage

La conception des zones de stockage résulte essentiellement de la volonté de donner au stockage un caractère modulaire. Le principe de modularité permet en effet de réaliser et d'exploiter les différentes zones de stockage concernées de façon souple et progressive. La création de modules de stockage constitués d'une ou plusieurs alvéoles est sous-tendue par ce principe. Les zones de stockage sont également conçues en fonction des considérations de sécurité et notamment de ventilation en cas d'incendie. Enfin, les considérations géotechniques ont conduit à écarter les ouvrages les uns des autres d'une distance d'environ cinq fois leur diamètre pour garantir leur stabilité mécanique.

Lorsque la fermeture est décidée, les différents constituants de la zone de stockage (alvéoles, galeries d'accès, galeries de liaison) sont scellés au moyen de bouchons à base d'argile gonflante de faible perméabilité et remblayés avec les déblais de creusement de la formation d'argilite. Ce processus est mis en œuvre de façon progressive par étapes successives. Les scellements assurent le fractionnement à long terme de la zone de stockage.

Dans la zone de stockage de déchets B, un module de stockage est constitué d'une seule alvéole desservie par une galerie d'accès orientée dans l'axe de l'alvéole. Les alvéoles affectées au stockage de colis contenant de la matière organique sont éloignées des autres alvéoles afin de limiter l'impact des perturbations chimiques que l'altération, à long terme, de cette matière organique peut engendrer.

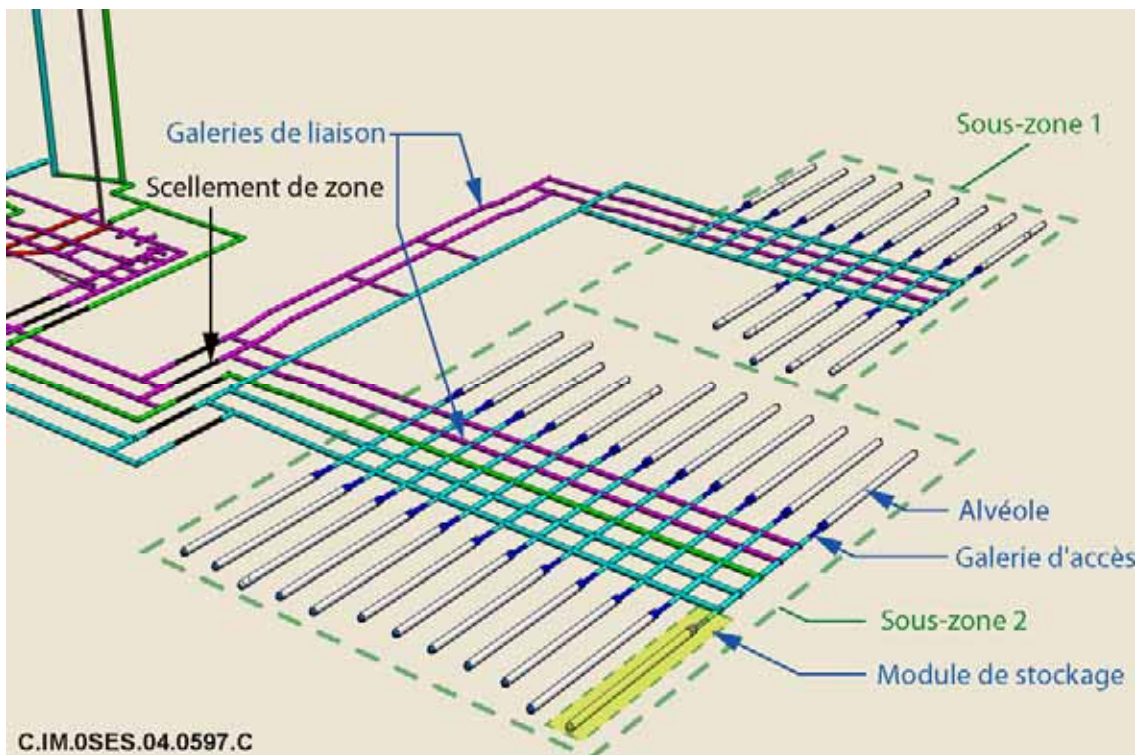


Figure 2.4.10 Organisation de la zone de stockage B

La figure ci-dessus illustre la possibilité de séparer la zone de stockage en deux sous-zones en fonction de leur contenu en matière organique.

Dans la zone de stockage de déchets C vitrifiés (ou de combustibles usés), un module de stockage est constitué de plusieurs dizaines d'alvéoles. Les alvéoles sont desservies par des galeries d'accès, orientées orthogonalement aux alvéoles. L'espacement entre les alvéoles, qui résulte essentiellement de la prise en compte des phénomènes thermiques, permet une dissipation suffisante de la chaleur.

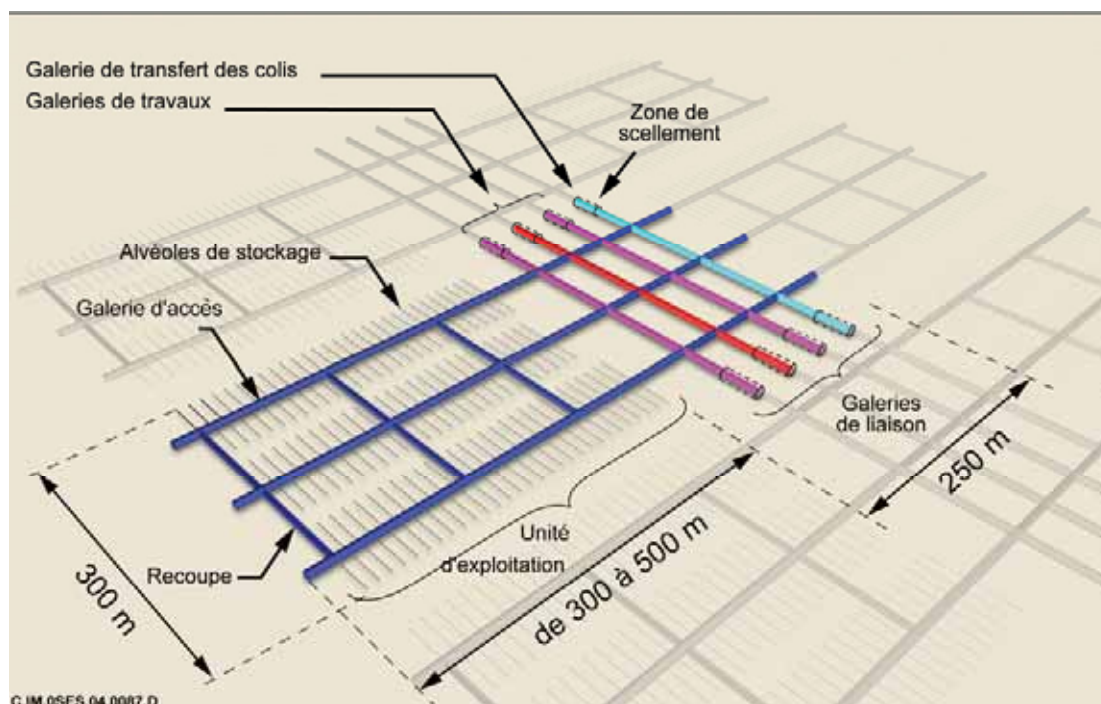


Figure 2.4.11 Modules de stockage de déchets C (ou de combustibles usés)

2.5 Le rôle des différents composants d'un stockage

Cette section récapitule les relations entre les composants d'un stockage, et les fonctions décrites à la section 2.1, pour l'exploitation et l'observation d'un stockage, puis à long terme. Au travers de ces fonctions, elle introduit ainsi les besoins auxquels répondent chacun des composants ou moyens manufacturés décrits dans les chapitres 4 à 10. Ces besoins seront détaillés dans les chapitres correspondants.

Aux colis de stockage et aux grands composants de l'architecture (modules de stockage, galeries de liaison, puits, scellements multiples, installations de surface) s'ajoutent des moyens opérationnels permettant de construire de nouveaux modules, d'y placer des colis et de gérer les installations de manière réversible.

2.5.1 Rôle des composants pour la mise en stockage réversible des colis de déchets

Certains composants se justifient uniquement par les opérations industrielles de mise en stockage des colis.

Ainsi, les installations de surface, et les moyens de construction, d'exploitation, et de gestion réversible des installations, n'ont pas de fonction de sûreté à long terme. Les installations de surface devraient avoir été démantelées ou réutilisées à d'autres fins après la fermeture, à l'exception potentiellement de la verse à déblais. Les moyens de construction, d'exploitation, de gestion des installations, seront quant à eux retirés autant que nécessaire lors de la fermeture, de manière à ne pas affecter la sûreté à long terme.

De même, les puits et galeries de liaison ne sont nécessaires que pour la construction et l'exploitation réversible d'un stockage. Cependant, ces composants subsisteront après la fermeture. S'il est décidé de

fermer le stockage, ces puits et galeries seront scellés et remblayés. Aussi, leur conception doit prendre en compte des fonctions de sûreté à long terme, identifiées au paragraphe suivant.

Quant aux colis et aux modules de stockage, ils contribuent autant à des fonctions opérationnelles qu'à des fonctions de sûreté après fermeture.

Le tableau 2.4.1 identifie les composants manufacturés d'un stockage qui contribuent, de manière plus ou moins déterminante, aux différentes fonctions industrielles qu'impliquerait la mise en œuvre d'un stockage. Il identifie aussi les fonctions dont l'étude doit prendre en compte des caractéristiques du milieu géologique ou des colis primaires.

Tableau 2.5.1 Mise en stockage des colis de déchets et composants d'un stockage

		Principaux composants manufacturés								
		Colis de stockage	Modules de stockage	Puits et galeries de liaison	Scellements d'avéoles	Scellements de puits et galeries de liaison	Remblais	Installations de surface	Moyens de construction, exploitation, gestion	Milieu géologique
<p>Fonctions Accueillir les colis de déchets dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien de manière réversible, en protégeant les personnes et l'environnement, en gérant les déchets d'exploitation et les déblais.</p>		Période								
Recevoir les colis primaires Réceptionner/décharger/renvoyer les moyens de transport										
Placer les colis dans les argilites du Callovo-Oxfordien		Exploitation et observation								
Préparer les colis de stockage										
Reconnaître le volume d'argilites, abattre l'argilite, enlever et stocker les déblais, équiper et caractériser les ouvrages										
Transférer les colis jusqu'à leur emplacement de stockage										
Ventiler les installations										
Soutenir mécaniquement les ouvrages										
Gérer les installations		Exploitation et observation								
Observer le comportement des installations, les surveiller et les maintenir										
Permettre de concevoir de nouveaux ouvrages										
Permettre de fermer les installations de stockage (préparer les matériaux, les acheminer, remblayer, sceller)										
Permettre de désceller les ouvrages, de récupérer les colis (les retirer, les remonter en surface, les gérer, les rendre transportables)										
Fonctions de sûreté opérationnelle		Exploitation et observation								
Confiner la radioactivité (assurer la non contamination des moyens et emballages de transport etc.)										
Protéger les personnes contre l'irradiation										
Sûreté-criticité (contrôler la masse de matière fissile dans les colis de combustibles usés etc.)										
Evacuer la puissance thermique résiduelle										
Evacuer les gaz de radiolyse										

Légende :



Contribution d'un composant manufacturé à une fonction



Fonction dont l'étude prend en compte des caractéristiques du milieu géologique ou des colis primaires

La figure suivante présente un synoptique simplifié des opérations industrielles de réception, préparation et transfert des colis, puis de fermeture, illustrant le rôle de certains composants dans ces opérations.

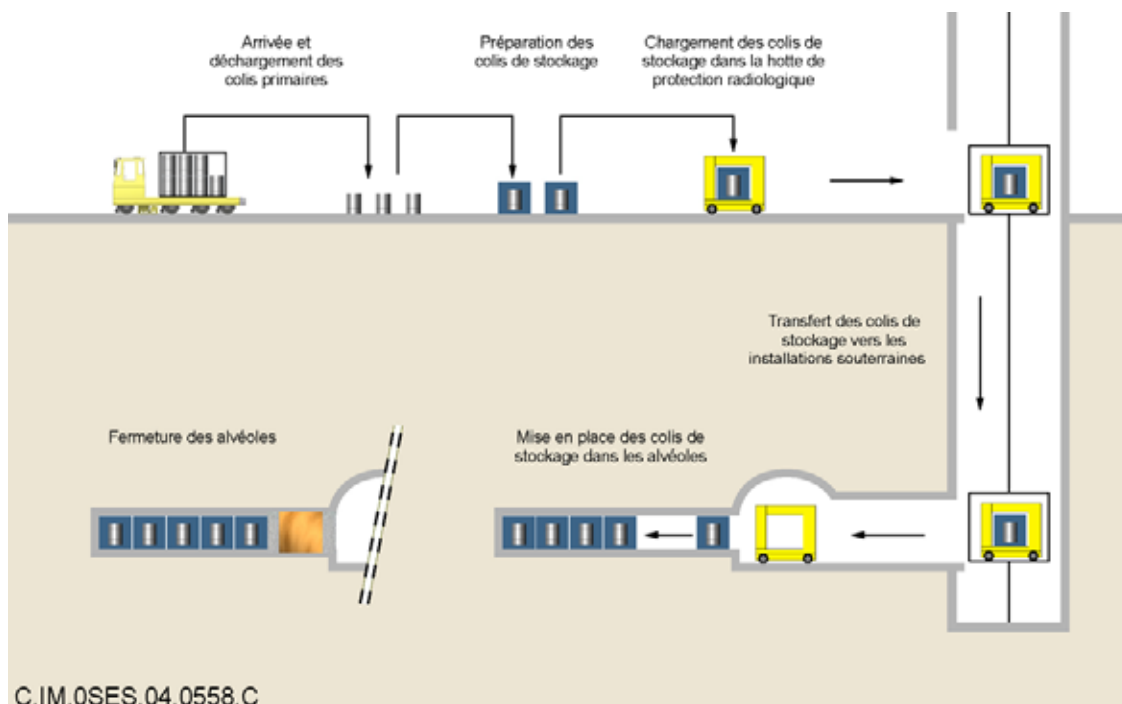


Figure 2.5.1 *Synoptique d'exploitation et de fermeture*

2.5.2 Rôle des composants d'un stockage vis-à-vis de ses fonctions de sûreté à long terme

Pour les principales fonctions de sûreté à long terme, la conception d'un stockage vise à mobiliser autant que possible les propriétés favorables du milieu argileux. Cet objectif se traduit en particulier par les dispositions architecturales proposées telles que, par exemple, l'implantation au milieu de la formation géologique et l'architecture en cul-de-sac. Il s'y ajoute des dispositions techniques visant à limiter les perturbations dans le milieu, notamment un dimensionnement pertinent des colis et alvéoles de stockage, des puits et des galeries, ainsi qu'une maîtrise des matériaux introduits dans ces ouvrages. Enfin, les composants manufacturés peuvent apporter une contribution plus directe à certaines fonctions de sûreté, de façon complémentaire ou redondante avec le milieu géologique. C'est le cas par exemple des matériaux mis en œuvre dans les alvéoles de stockage, ou des scellements des ouvrages.

Le Tableau 2.5.2 identifie, pour les différentes fonctions de sûreté du stockage, les composants manufacturés qui y contribuent, directement ou en permettant de mobiliser des propriétés favorables du milieu géologique. Il indique aussi les fonctions dont l'étude nécessite de prendre en compte des caractéristiques du milieu géologique, ou des colis primaires. Certains composants manufacturés sont prévus pour assurer une fonction en priorité, même s'ils peuvent être mobilisés pour d'autres. Dans un tel cas, leur fonction principale est identifiée par une croix.

Tableau 2.5.2 Fonctions de sûreté à long terme et composants d'un stockage

Fonctions		Principaux composants manufacturés										
		Période	Colis de stockage	Modules de stockage	Puits et galeries de liaison	Scelllements d'alvéoles	Scelllements de puits et galeries d'e liaison	Remblais	Installations de surface	Moyens de construction, exploitation, gestion	Milieu géologique	Colis primaires
Protéger les personnes et l'environnement de la dissémination de substances radioactives en tenant compte d'évènements naturels probables et de situations hypothétiques, en protégeant l'environnement d'autres impacts (chimique)												
Isoler les déchets des phénomènes d'érosion en surface et des activités humaines banales		Après fermeture										
S'opposer à la circulation d'eau Limiter les flux d'eau et la vitesse de circulation						X					◆	
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage												
Déchets B	Protéger les déchets métalliques de la corrosion	Après fermeture										
	Protéger le bitume d'enrobage (déchets bitumés) : température, déformations, pH	Toutes										
Déchets C vitrifiés	Interdire l'arrivée d'eau sur le verre pendant la période thermique	Période thermique	X									
	Limiter l'altération aqueuse du verre, le transport des espèces dissoutes au voisinage, le pH	Après fermeture										
Combustibles usés	Interdire l'arrivée d'eau sur les assemblages	Période thermique	X									
	Limiter l'altération aqueuse de la céramique, le transport des espèces dissoutes au voisinage	Après fermeture										
Limiter la dissolution des radionucléides, assurer des conditions chimiques réductrices										◆		
Filtrer les colloïdes											◆	
Retarder et atténuer la migration des radionucléides vers l'environnement												
Contrôler la migration par diffusion, rétention, dispersion dans la formation d'accueil		Après fermeture										◆
Retarder la migration dans des composants ouvragés		Toutes										
Préserver la capacité de dispersion naturelle dans les formations géologiques environnantes		Après fermeture										
Préserver les propriétés favorables du milieu												
Limiter les déformations mécaniques dans les argilites du Callovo-Oxfordien		Toutes						X				
Dissiper la chaleur (déchets C vitrifiés et combustibles usés essentiellement)												
Protéger les modules de stockage des perturbations chimiques induites par l'altération de certains colis												
Rester sous-critique (combustibles usés, déchets C vitrifiés type C4, déchets B –types B3/4/5-)												
Fractionner le stockage												

Légende :



Contribution d'un composant manufacturé à une fonction



Fonction mobilisant une propriété favorable du milieu géologique



Fonction principale d'un composant



Fonction dont l'étude prend en compte des caractéristiques du milieu géologique ou des colis primaires

3

Les déchets à haute activité et à vie longue

3.1	La production de déchets HAVL, les scénarios d'étude.....	72
3.2	Description des colis primaires de déchets	74
3.3	Le modèle d'inventaire.....	96
3.4	Hypothèses de flux de réception de colis primaires	103

Le présent chapitre décrit les colis primaires de déchets HAVL qui sont considérés pour l'étude des possibilités de stockage. Il en illustre en particulier la diversité. Il se fonde sur les résultats du travail réalisé en commun entre l'Andra et les producteurs en matière (i) de recensement, (ii) de rassemblement et de structuration des connaissances.

Il présente tout d'abord les scénarios de production de déchets qui sous-tendent l'inventaire pris en compte. Le recensement des déchets existants s'appuie sur la connaissance des processus actuels et passés, les bilans de production de chaque installation, l'identification des lieux d'entreposage et la maîtrise de leur contenu. Pour ce qui concerne les déchets futurs, des hypothèses ont été formulées en matière de poursuite de la production par les diverses installations. Pour les déchets provenant du parc électronucléaire, plusieurs scénarios ont été retenus pour couvrir diverses situations possibles : retraitement des combustibles usés UOX en continuité avec la pratique industrielle actuelle, retraitement des combustibles URE et MOX, possibilité d'augmentation de la puissance thermique des déchets C vitrifiés, hypothèse exploratoire d'un stockage direct de combustibles UOX, URE et MOX.

Ce chapitre présente ensuite les caractéristiques des colis primaires pour chaque famille recensée, existante ou à produire, sur la base des connaissances pertinentes rassemblées par les producteurs.

Il fournit également un modèle d'inventaire [3] qui constitue la base sur laquelle est fondé l'ensemble des études de conception et de dimensionnement du stockage. Le modèle rassemble les différentes familles de déchets en définissant des « colis types » qui couvrent une gamme plus ou moins étendue de colis primaires. La notion de colis types est un élément essentiel de structuration des options techniques envisagées pour répondre à la diversité de l'ensemble des déchets primaires. Elle constitue ainsi une clé de lecture pour les chapitres suivants.

Enfin, il présente les hypothèses retenues en matière de chroniques de mise en stockage des déchets pour divers scénarios.

3.1 La production de déchets HAVL, les scénarios d'étude

Les secteurs d'activités concourant à la production du plus grand volume de déchets HAVL relèvent de l'industrie électronucléaire (réacteurs de production d'électricité d'EDF, usines de retraitement des combustibles COGEMA, usine MELOX de fabrication des combustibles MOX) ainsi que les activités de recherche et de défense nationale (centres CEA).

On considère également des déchets produits en amont du cycle, lors d'opérations de traitement de minerai d'uranium, ainsi que des objets radioactifs actuellement sans usage, auparavant utilisés dans diverses activités industrielles et médicales.

Actuellement, les combustibles usés déchargés des réacteurs à eau pressurisée (parc REP actuel composé de 58 réacteurs) sont retraités dans les usines de La Hague, à l'exception des combustibles URE et MOX, élaborés respectivement à partir d'uranium et de plutonium de retraitement, qui restent aujourd'hui entreposés en piscines [39].

Les opérations de retraitement produisent différents types de déchets, soit directement issus des combustibles usés (solutions de produits de fission et d'actinides mineurs, déchets de structures des assemblages), soit liés à l'usage des installations dans le cadre d'opérations de maintenance (déchets technologiques provenant du remplacement de pièces et de matériels divers) ou de traitement d'effluents radioactifs (boues). Actuellement, le conditionnement des déchets s'effectue en ligne dans les usines UP2-800 et UP3 de La Hague. Dans les usines de génération précédente (UP2-400 de La Hague et UP1 de Marcoule, aujourd'hui arrêtées) qui ont retraité des combustibles issus de différentes filières de réacteurs (notamment la filière de première génération UNGG « Uranium naturel-graphite-gaz »), une partie des déchets a été entreposée, sous une forme non conditionnée, dans des installations spécifiques ; on notera toutefois que, à l'exception des solutions dites UMo entreposées aujourd'hui à La Hague (voir §3.2.2.1), les solutions de produits de fission ont toutes été conditionnées, ainsi que, à Marcoule, les boues d'effluents.

Par ailleurs, l'exploitation des réacteurs nucléaires de production d'électricité fait appel à des dispositifs utilisés pour le démarrage et le pilotage des réacteurs ; après une certaine durée d'utilisation, ces dispositifs sont remplacés et constituent des déchets. Il s'agit principalement de grappes de commande et de poisons neutroniques et, dans une moindre mesure, de déchets divers tels que des grappes sources et des pièces métalliques (par exemple des doigts de gant et des broches). L'ensemble des déchets actuellement produits est entreposé, dans des piscines, à proximité des réacteurs.

Autre secteur générateur de déchets, les recherches réalisées au CEA, notamment en soutien du programme électronucléaire français, ainsi que l'exploitation et la maintenance courante de ses installations, ont contribué à une production diversifiée de déchets. La majorité de ces déchets, constitués de déchets solides et d'effluents de moyenne activité, a fait l'objet d'un conditionnement mettant en œuvre des matériaux d'immobilisation et des emballages de natures et de géométries diverses.

Enfin, les activités liées à la défense nationale engendrent des déchets technologiques de moyenne activité.

Pour les études de stockage, l'inventaire des colis (en nature et en quantité) prend en compte l'ensemble des déchets déjà produits, et ceux qui pourront l'être par l'exploitation des installations nucléaires existantes. Cela implique, pour ce qui concerne les productions futures, de formuler des hypothèses de production et de conditionnement de déchets, en particulier en matière de gestion du parc électronucléaire.

Le parc actuel de réacteurs électrogènes à eau pressurisée se compose de 58 réacteurs, dont la mise en service s'est effectuée entre 1977 et 1999. Le tonnage de combustibles nucléaires qui serait déchargé de ces réacteurs sur la totalité de leur durée d'exploitation est estimé à 45 000 tonnes de « métal lourd » (TML). Cette estimation se fonde sur une combinaison d'hypothèses portant sur (i) la durée de vie moyenne des tranches (quarante années), (ii) la production d'énergie (16 000 térawatts-heures de production cumulée), (iii) la montée progressive des taux de « combustion » des combustibles en réacteurs¹⁷. Les types de combustibles qui ont été considérés et leurs taux de combustion moyens sont les suivants :

- trois générations de combustibles à l'oxyde d'uranium : UOX1, UOX2, UOX3, irradiés respectivement à 33 gigawatts-jours par tonne de combustible (GWj/t), 45 GWj/t, 55 GWj/t, en moyenne ;
- des combustibles contenant de l'uranium recyclé (URE) irradiés en moyenne à 45 GWj/t ;
- des combustibles mixtes à l'oxyde d'uranium et à l'oxyde de plutonium recyclé (MOX) irradiés à 48 GWj/t en moyenne.

Sur cette base, quatre scénarios de gestion des combustibles nucléaires ont été retenus pour mener les études. Le principe de ces scénarios consiste à encadrer différentes stratégies industrielles possibles, sans chercher à privilégier l'une ou l'autre d'entre elles. Cette démarche donne accès à une très large gamme de types de déchets et permet une instruction technique des questions associées aux divers colis.

Les trois premiers scénarios, notés S1a, S1b et S1c, correspondent à la poursuite du retraitement de combustibles usés déchargés des réacteurs EDF. Le scénario S1a suppose le retraitement de l'ensemble de ces combustibles (UOX, URE et MOX). Il lui est associé l'hypothèse d'une incorporation, dans du verre, de mélanges de produits de fission et d'actinides mineurs provenant de combustibles UOX et MOX ; par ailleurs, dans un objectif d'étude, une part très faible du plutonium provenant de combustibles UOX retraités est supposée incorporée dans certains colis. Ce scénario couvre ainsi des typologies variées de colis C vitrifiés. Dans les scénarios S1b et S1c, les combustibles MOX ne sont pas retraités ; cela conduit à explorer l'hypothèse de leur stockage direct. Les scénarios S1b et S1c ont été distingués pour étudier, dans le scénario S1b, la possibilité d'augmenter la

¹⁷ Le taux de combustion d'un assemblage de combustible nucléaire traduit l'énergie produite en réacteur par la matière fissile qu'il contient (oxyde d'uranium ou mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium)

concentration de déchets dans les verres, par rapport aux colis produits actuellement ; cette plus grande concentration se traduirait par un dégagement thermique des colis légèrement supérieur. Enfin, un quatrième scénario, noté S2, qui suppose l'arrêt du retraitement, supporte l'étude exploratoire d'un stockage direct de combustibles UOX et URE, ainsi que celui de combustibles MOX comme dans les scénarios S1b et S1c. Ce scénario suppose que les combustibles soient considérés comme des déchets, ce qui, on le rappelle, n'est pas le cas aujourd'hui.

Pour permettre une estimation quantitative des déchets produits, les scénarios S1a, S1b et S1c se fondent sur la répartition suivante des divers types de combustibles déchargés du parc de réacteurs : 8 000 tML d'UOX1 (33 GWj/t), 20 500 tML d'UOX2 (45 GWj/t), 13 000 tML d'UOX3 (55 GWj/t), 800 tML d'URE (45 GWj/t) et 2 700 tML de MOX (48 GWj/t). Dans les scénarios S1b et S1c, l'étude du stockage direct porte sur la totalité des 2 700 tML de combustibles usés MOX.

Le scénario S2 considère hypothétiquement la poursuite du retraitement d'une partie des combustibles UOX jusqu'en 2010 (soit 8 000 tML d'UOX1 et 8 000 tML d'UOX2), puis l'arrêt de ce retraitement. La suspension du recyclage de l'uranium et du plutonium modifie la répartition totale des différents types de combustibles déchargés des réacteurs. L'étude du stockage direct des combustibles non retraités porte alors sur 29 000 tML comprenant 12 500 tML d'UOX2, 14 000 tML d'UOX3, 500 tML d'URE et 2 000 tML de MOX.

Comme cela a été rappelé au chapitre 2, les études se réfèrent à des déchets conditionnés. Pour cela, des modes de conditionnement ont été définis pour les déchets existants non conditionnés ainsi que pour les futurs déchets. Les hypothèses adoptées reconduisent les procédés industriels actuellement mis en œuvre par les producteurs : vitrification, compactage, cimentation, bitumage.

Les différents scénarios considérés pour l'étude du stockage permettent aussi d'avoir une approche robuste par rapport aux différentes évolutions possibles en matière de gestion de l'aval du cycle.

En marge de ces scénarios, on s'est intéressé aussi à la gestion des combustibles usés provenant de réacteurs français autres que les réacteurs à eau pressurisée d'EDF (réacteurs de recherche et militaires notamment). Leur retraitement ne produira en tout état de cause qu'une quantité marginale de déchets par rapport aux déchets issus du retraitement des combustibles EDF. Pour ces combustibles, on a plus particulièrement étudié, à titre exploratoire, l'éventualité d'un stockage direct sans présager des choix de gestion qui pourraient être faits.

3.2 Description des colis primaires de déchets

Le recensement des différents déchets et la définition de leur mode de conditionnement conduisent à une variété importante de familles de colis primaires (61 au total) ; celles-ci diffèrent les unes des autres par leur contenu chimique et radiologique, leur niveau de puissance thermique et d'irradiation suivant la présence de certains radionucléides, leur nature et géométrie d'emballage et leur quantité.

Cette section décrit ces différents colis primaires. Au-delà de la simple distinction entre les déchets de catégorie B (déchets de moyenne activité et à vie longue, ne dégageant pas ou peu de chaleur), de catégorie C (déchets vitrifiés de haute activité) et le cas échéant les combustibles usés, les colis présentant des problématiques similaires au regard des fonctions du stockage sont regroupés.

3.2.1 Colis primaires de déchets B

Le recensement des déchets B existants et prévisionnels fait apparaître une grande diversité de natures de déchets, en fonction de leur origine et des processus qui les ont produits.

Les paragraphes suivants fournissent une description de ces déchets et de leurs modes de conditionnement effectifs ou prévisionnels. Dans la suite, les déchets ont été regroupés, sur la base essentiellement de leur nature et de leur mode de conditionnement, selon les sept ensembles suivants : déchets métalliques activés des réacteurs nucléaires, boues de traitement d'effluents liquides bitumées, déchets technologiques cimentés ou compactés, déchets de structure cimentés ou compactés, déchets de structure et technologiques mis en fûts, sources, déchets au radium et à l'américium.

3.2.1.1 Déchets métalliques activés des réacteurs nucléaires

Un premier ensemble de déchets B provient directement des réacteurs de production électrique ; il s'agit de déchets d'exploitation du parc actuel de réacteurs à eau pressurisée (REP) ainsi que de quelques déchets activés en provenance du réacteur à neutrons rapides SUPERPHENIX.

Les grappes REP de commande et poisons neutroniques représentent plus de quatre-vingts pour cent de la masse totale de déchets activés. Elles sont toutes constituées de vingt-quatre crayons, suspendus à un dispositif de maintien, qui s'introduisent dans des emplacements laissés libres à cet effet dans des assemblages combustibles (voir Figure 3.2.1).

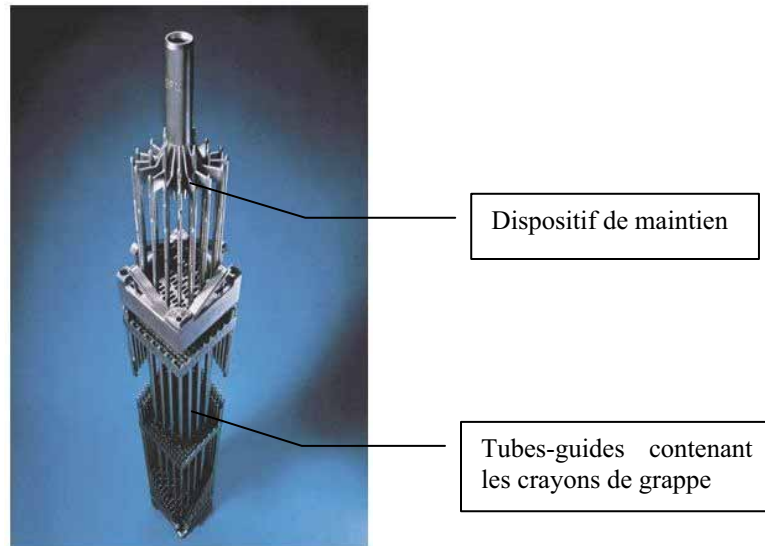


Figure 3.2.1 Assemblage combustible REP avec sa grappe

Les grappes poisons neutroniques sont utilisées lors du démarrage des réacteurs (premier cycle de fonctionnement) pour contrôler la réactivité excédentaire due à la présence de combustible entièrement neuf ; elles sont retirées aux cycles suivants et deviennent alors des déchets. Les grappes de commande servent à moduler le niveau de puissance du réacteur ainsi qu'à assurer son arrêt instantané, le cas échéant. Elles sont remplacées après un séjour de plusieurs cycles en réacteur et deviennent aussi des déchets.

Certains crayons des grappes contiennent des matériaux absorbants de neutrons : du bore sous forme de verre PYREX pour les crayons des grappes poisons neutroniques, du carbure de bore (B_4C) et/ou un alliage d'argent, d'indium et de cadmium (AIC) pour les crayons des grappes de commande. Le nombre de crayons contenant ces matériaux varie suivant les réacteurs.

D'autres déchets activés provenant des réacteurs REP sont des déchets métalliques correspondant, pour l'essentiel, à des tubes borgnes, appelés doigts de gant RIC (Réseau d'Instrumentation du Cœur), équipant la cuve du réacteur (ils sont situés sous la cuve). Ces tubes permettent le passage des sondes neutroniques utilisées pour le contrôle de la réaction nucléaire. Ils sont remplacés, si nécessaire, après une certaine durée d'utilisation et constituent alors des déchets.

Ces différents déchets d'exploitation des réacteurs présentent des spécificités chimiques et radiologiques qui les distinguent des autres déchets B. Leur spécificité chimique est due aux natures des matériaux constitutifs de certains des déchets ; en particulier, les grappes de commande apportent des quantités significatives d'alliages AIC et B_4C alors que les autres déchets B n'en contiennent généralement pas. L'activité radiologique est due à des produits d'activation seuls formés par activation neutronique des éléments et impuretés constitutifs des matériaux des déchets, lors de leur séjour en réacteur ; ces produits d'activation sont localisés à l'intérieur des matériaux et sont, de ce fait, peu dispersables. Parmi eux, les produits d'activation contribuant majoritairement à l'activité des

déchets sont, par ordre décroissant, le nickel 63 (^{63}Ni) qui est un isotope à vie longue de période égale à 100 ans, puis le fer 55 (^{55}Fe) et le cobalt 60 (^{60}Co) qui sont des isotopes à vie courte.

Cette activité importante en ^{60}Co a des conséquences sur le plan thermique. Ainsi, ces déchets font partie des déchets de catégorie B présentant le niveau de puissance thermique relativement le plus élevé (soit environ 20 watts par colis, au moment de la production du colis, dans les hypothèses de conditionnement indiquées ci-après). Du fait de cette contribution prépondérante du cobalt, la puissance thermique résiduelle du colis diminue rapidement avec la décroissance du cobalt. A titre d'illustration, la puissance thermique est divisée par 2 après 5 ans de refroidissement, par 3,5 après 10 ans de refroidissement et par 6 après 15 ans de refroidissement. Une autre conséquence de cet inventaire radiologique est le niveau d'irradiation élevé des colis. Ainsi, le débit d'équivalent de dose β - γ au « pseudo-contact » (c'est-à-dire à une distance de 5 centimètres) du colis est d'environ 50 sieverts par heure (Sv/h), au moment de sa production. Il est imputable pour l'essentiel au ^{60}Co , mais aussi à l'argent 108m ($^{108\text{m}}\text{Ag}$) dont la période est de 420 ans, et reste à un niveau relativement élevé, même après 10 ans de refroidissement (de l'ordre de 15 Sv/h).

L'hypothèse de conditionnement considérée dans l'étude¹⁸ est un compactage des déchets placés dans des étuis¹⁹, puis une mise en conteneurs en acier inoxydable appelés « Conteneur Standard de Déchets Compactés ou CSD-C » de petit gabarit (voir Figure 3.2.2).



Figure 3.2.2 Conteneur Standard de Déchets Compactés (CSD-C)

L'hypothèse de conditionnement comprend une masse de 400 kilogrammes de déchets par colis, constitués d'un mélange des différents types de déchets activés dans les proportions suivantes : 5 % de grappes poisons neutroniques, 78 % de grappes de commande et 17 % de déchets métalliques divers. La masse du colis fini est de l'ordre de 510 kilogrammes.

On notera que ces colis ne contiennent pas de matériau organique, et ne sont pas susceptibles de produire du gaz (hydrogène) par radiolyse.

3.2.1.2 Boues de traitement d'effluents liquides bitumés

Le deuxième ensemble de déchets B provient d'effluents liquides radioactifs liés à l'usage des installations de retraitement des combustibles. Les effluents considérés ici sont générés à différentes étapes du retraitement des combustibles et lors d'interventions menées sur les matériels et les installations (décontaminations, rinçages). Ces effluents sont collectés dans des stations de traitement où ils sont décontaminés par des procédés chimiques, avant rejet. Le déchet résiduel est alors récupéré sous la forme de boues.

¹⁸ Pour mémoire, un mode de conditionnement alternatif, non traité ici, est en cours d'étude à EDF

¹⁹ Les grappes et les doigts de gant RIC de grandes dimensions sont découpés en tronçons avant leur mise en étui de compactage

Dans les stations de traitement des effluents STEL de Marcoule et STE3 de La Hague, démarrées respectivement en 1966 et 1989, ces boues ont été conditionnées sous la forme d'un enrobé de bitume, coulé dans des fûts en acier. En revanche, les boues issues des effluents produits et traités chimiquement dans la station de traitement des effluents n° 2 (STE2) de La Hague, de 1966 à 1990, ont été progressivement entreposées dans des cuves et silos de l'atelier, en attente de conditionnement. Le mode de conditionnement envisagé pour ces boues est aussi un enrobage dans une matrice bitumineuse.

Les enrobés de bitume sont constitués d'extrait sec, obtenu par séchage des boues, de bitume de distillation directe 70/100, d'additif tensioactif, plus une faible quantité d'eau résiduelle. La composition moyenne de l'enrobé, exprimée en pourcentage massique, est la suivante :

- extrait sec des boues : 39 % en masse de l'enrobé. Cet extrait sec est lui-même composé d'un mélange de sels insolubles et de sels solubles, en proportions variables suivant l'origine des boues ;
- bitume : 58 % en masse de l'enrobé ;
- tensioactif : 1 % en masse de l'enrobé ;
- eau : 2 % en masse de l'enrobé.

L'activité des déchets provient de traces de produits d'activation, de produits de fission et d'actinides répartis de manière homogène dans la masse de l'enrobé. Parmi ceux-ci, les radionucléides à vie courte ou moyenne contribuent à une part importante de l'activité des colis. Cependant, ils sont nettement moins irradiants que ceux présentés au paragraphe précédent : le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact du colis est au maximum d'un sievert par heure. Du fait de leur activité modérée, ils ne présentent pas de dégagement thermique.

La particularité de ces colis est liée essentiellement à la nature chimique des déchets conditionnés qui apportent une charge importante en sels et en matière organique. Aussi, la radiolyse du bitume engendre une production de gaz, majoritairement de l'hydrogène, ainsi que des traces de monoxyde, de dioxyde de carbone et de méthane (pour l'hydrogène, 1 à 2 litres²⁰ par an pour les colis STE3 et STEL, 9 à 10 litres par an pour les colis STE2).

Par ailleurs, les colis d'enrobés de bitume ne sont pas tous de même géométrie. Un premier groupe de colis, représentant 45 % des colis inventoriés, correspond à des fûts primaires en acier inoxydable de 238 litres (STE3/STE2) et de 245 litres (STEL à partir d'octobre 1996). Ces colis sont illustrés à la Figure 3.2.3.

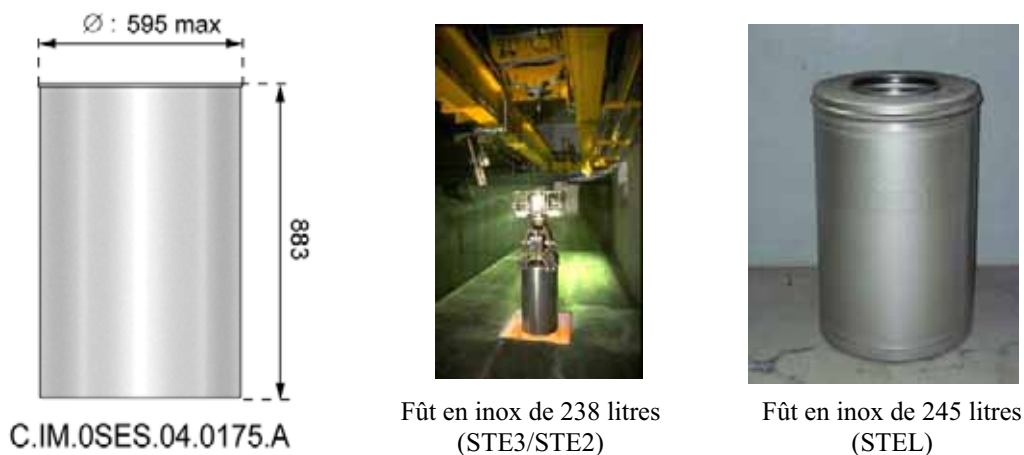


Figure 3.2.3 Fûts inox STE3/STE2 et STEL

²⁰ A pression atmosphérique

Le deuxième groupe de colis (55 % des colis de bitume inventoriés) correspond à des fûts en acier inoxydable de 428 litres, dénommés également surfûts EIP²¹. Ces fûts (voir Figure 3.2.4) sont utilisés pour le reconditionnement des fûts primaires en acier non allié produits sur la STEL entre 1966 et octobre 1996.

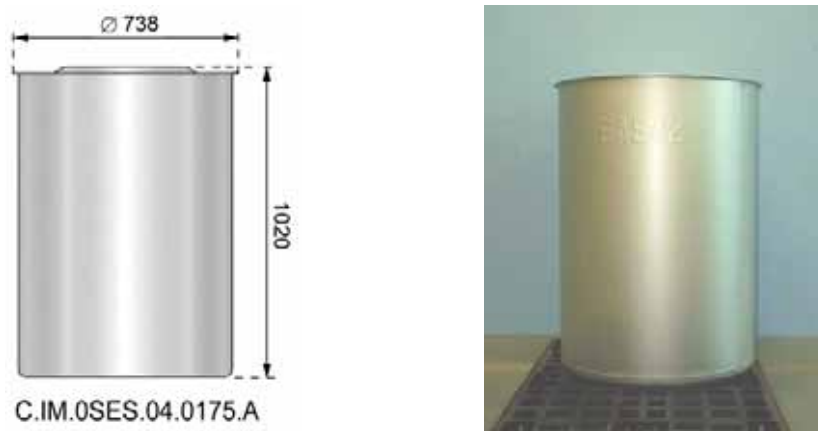


Figure 3.2.4 Fût inox utilisé pour le reconditionnement des fûts primaires en acier non allié

L'hypothèse retenue pour les études est un remplissage intégral du vide interstitiel entre les deux fûts par un matériau non compressible, de type mortier par exemple, afin de limiter les déformations mécaniques à long terme dans le stockage.

La masse de déchets conditionnés est en moyenne de 220 à 240 kilogrammes par colis comprenant environ 90 kilogrammes d'extrait sec et 130 kilogrammes de bitume. Les masses moyennes des colis finis sont de 240 kilogrammes pour les colis STE3/STE2 et STEL et de 330 kilogrammes pour les colis STEL reconditionnés.

3.2.1.3 Déchets technologiques cimentés ou compactés

Un troisième ensemble de déchets correspond aux déchets technologiques issus du fonctionnement et de la maintenance des installations nucléaires exploitées par COGEMA et par le CEA. Ils sont constitués en grande partie de déchets solides de natures diverses (métaux divers, matières organiques) mais comprennent aussi des boues de filtration et des concentrats d'évaporation. Cet ensemble inclut aussi divers déchets produits à Marcoule tels que du graphite, des résines échangeuses d'ions et des zéolithes. L'activité radiologique des déchets, notamment celle des déchets technologiques, est due, le plus souvent, à la présence d'une contamination à la surface des déchets par des produits de fission et/ou des produits d'activation et/ou des actinides.

Suivant leur origine de production et/ou leur nature, ces déchets font l'objet de modes de conditionnement différents. Les problématiques posées par ces colis de déchets sont donc pour l'essentiel liées à la diversité (i) de leur contenu chimique, en lien avec les natures de déchets et les matrices de conditionnement utilisées, (ii) des formes et des matériaux de contenants. De par leur nature chimique, certains des colis sont aussi susceptibles de produire des gaz par radiolyse, essentiellement de l'hydrogène. Ces colis ne génèrent pas de chaleur.

Les divers colis de déchets technologiques existants et prévisionnels peuvent être regroupés en neuf sous-ensembles, en tenant compte des natures de déchets, de leurs modes de conditionnement et des contenants.

Un premier sous-ensemble de colis regroupe des contenants en béton de 1 000 litres, de fabrication CEA, contenant des boues, des gravats, des terres et des sables faiblement contaminés, immobilisés dans une matrice ciment-bitume. Un certain nombre de ces contenants béton ont été reconditionnés,

²¹ Le terme EIP « Entreposage Intermédiaire Polyvalent » désigne l'installation d'entreposage implantée sur le site de Marcoule qui regroupera, à terme, l'ensemble des colis de déchets B de ce site

suite à des détériorations, dans des conteneurs métalliques en acier non allié (voir Figure 3.2.5). Ces deux formes de colis sont de gabarit nettement supérieur à celui des colis présentés aux paragraphes précédents ; leur masse est de l'ordre de 3,2 tonnes en moyenne. Le nombre de ces colis est très faible (90 colis). Par précaution, en l'absence de données précises, on a considéré la possibilité d'une production d'hydrogène par radiolyse de l'eau de la matrice.



Figure 3.2.5 Conteneur en acier non allié utilisé pour le reconditionnement des conteneurs béton 1 000 litres

Un deuxième sous-ensemble de colis, issus du site de COGEMA La Hague, contient des déchets technologiques ou des déchets pulvérulents constitués d'un mélange de résines, de zéolithes, de diatomées et de graphite, conditionnés dans une matrice cimentaire à l'intérieur de conteneurs cylindriques en béton fibré, dits CBF-C'2 (voir Figure 3.2.6). On notera que le conditionnement des déchets technologiques s'est effectué, entre 1990 et 1994, dans des conteneurs en amiante-ciment (dits CAC), ces emballages étant remplacés, à partir de 1994, par des conteneurs en béton fibré. Les deux types de conteneurs sont de même géométrie. Les masses des colis finis varient de 1,5 à 3 tonnes, avec une moyenne de l'ordre de 2,4 tonnes. Les déchets technologiques sont constitués de matériaux métalliques ou organiques. Le débit d'équivalent de dose β - γ , au pseudo-contact (5 cm) des colis, est de l'ordre de 0,5 Sv/h, pour les colis les plus irradiants. Pour ces colis, il est pris en compte une production d'hydrogène, par radiolyse des matières organiques et de l'eau de la matrice cimentaire ; cette production est de 1 à 2 litres²² par an.

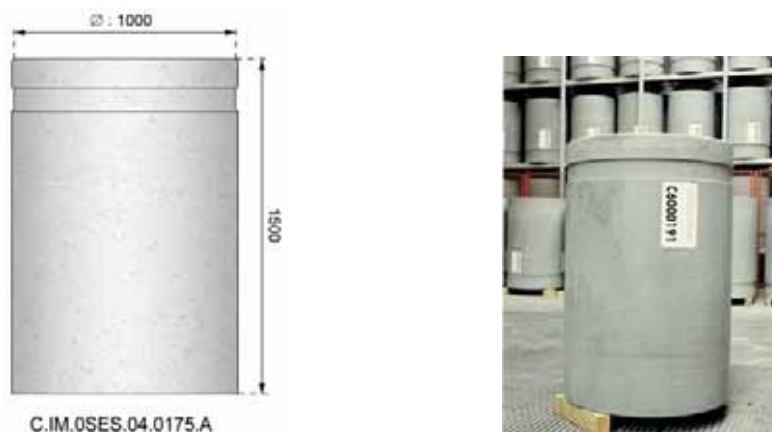


Figure 3.2.6 Conteneur béton fibres cylindrique (CBF-C'2)

²² A pression atmosphérique

Un troisième sous-ensemble de colis, de fabrication CEA, regroupe des conteneurs en béton de 1 800 litres contenant des déchets divers, métalliques et organiques, conditionnés dans une matrice ciment-bitume ou dans un mortier. Ces colis ont tous été produits entre 1964 et 1987 : 25 % des conteneurs béton ont fait l'objet de réparations (ragréage) et 75 % reconditionnés dans des conteneurs en acier non allié, suite à des détériorations (voir Figure 3.2.7). Ici encore, les gabarits des colis sont importants.



Figure 3.2.7 Conteneur en acier non allié utilisé pour le reconditionnement des conteneurs béton 1 800 litres

Les masses des colis finis varient entre 2,7 tonnes et 6,8 tonnes. Le nombre de ces colis est ici encore faible (180 colis). Par précaution, comme précédemment, une production potentielle d'hydrogène, par radiolyse des matières organiques et de l'eau de la matrice, est aussi à considérer. Il est important de noter que ces colis ne sont pas irradiants ; ils peuvent donc être manipulés en présence d'opérateurs.

Un quatrième sous-ensemble de colis, de fabrication CEA, regroupe des fûts de boues de filtration (production en cours) ou des fûts de concentrats d'évaporation (production arrêtée) cimentés, conditionnés dans des conteneurs en béton de 500 litres (voir Figure 3.2.8). Au stade actuel, ce même mode de colisage est retenu comme hypothèse de référence pour les fûts produits sur le centre CEA de Valduc contenant soit des boues, soit des concentrats, soit un mélange de boues-concentrats cimentés. On notera que le blocage des fûts de déchets dans les conteneurs béton, au moyen d'un mortier, n'est plus pratiqué depuis 1996.

Les masses des colis finis varient entre 770 et 920 kilogrammes.

Comme pour les déchets précités au paragraphe 3.2.1.2 (boues bitumées), ces colis se distinguent des autres colis de déchets technologiques par la nature chimique du déchet conditionné, notamment la présence de sels. On considère ici aussi une production potentielle d'hydrogène, par radiolyse de l'eau de la matrice. Ces colis, comme ceux du sous-ensemble précédent, ne sont pas irradiants.

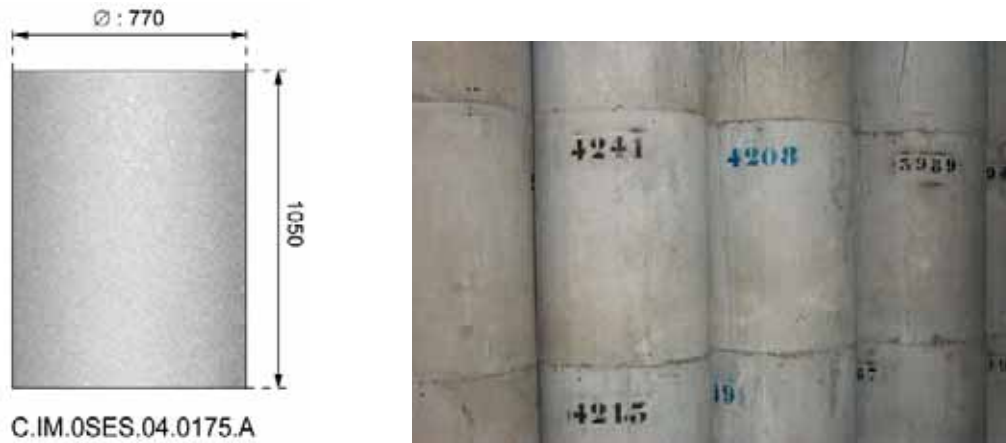


Figure 3.2.8 Conteneur béton de 500 litres

Un cinquième sous-ensemble de colis regroupe des déchets solides et des boues qui seront conditionnés dans de futures installations du CEA : CEDRA et AGATE. L'hypothèse retenue, au stade actuel, est un conditionnement des déchets dans des conteneurs en béton fibré de type CBF-C'2. Il est supposé également que les déchets seront bloqués dans les conteneurs au moyen d'un mortier. Par précaution, une production potentielle d'hydrogène par radiolyse de l'eau constitutive du mortier est considérée. Ici encore, il s'agit de colis non irradiants.

Un sixième sous-ensemble de colis regroupe des déchets technologiques divers, dits déchets alpha, essentiellement contaminés par du plutonium lors des opérations de fabrication des combustibles MOX ou de retraitement de combustibles usés (en particulier pour le conditionnement du plutonium). Les déchets les plus représentatifs, en termes de natures et de flux, sont les déchets issus de la fabrication des combustibles MOX dans l'usine MELOX (Marcoule). Ils sont composés de déchets organiques, de filtres et de déchets divers à dominante métallique en provenance de boîtes à gants. Le mode de conditionnement prévu est un compactage des déchets, puis une mise en CSD-C réalisés dans l'atelier ACC de l'usine de La Hague. Suivant les hypothèses retenues, les colis contiennent un mélange des différents déchets précités. La masse des colis finis est de 635 kilogrammes en moyenne. Comme précédemment, la présence de matières organiques dans les colis conduit à considérer une production d'hydrogène, par radiolyse de ces matières. Ces colis ne sont pas irradiants.

Un septième sous-ensemble de colis regroupe des déchets pulvérulents de l'usine COGEMA de Marcoule. Les déchets proviennent soit des différents systèmes mis en œuvre pour la filtration des eaux (résines échangeuses d'ions, zéolithes, diatomées, plus des boues de fond de piscines), soit du traitement mécanique des combustibles (graphite). Le mode de conditionnement prévisionnel est un enrobage des déchets dans une matrice ciment et une mise en fûts en acier inoxydable de 428 litres, (fûts EIP ; voir Figure 3.2.9). Suivant les hypothèses retenues, les fûts contiennent un mélange des différents déchets précités. La masse des colis finis est de 720 kilogrammes en moyenne. Une production potentielle d'hydrogène par radiolyse de l'eau du béton de la matrice est à prendre en compte. Le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact (5 cm) des colis est faible, soit environ 0,05 Sv/h.

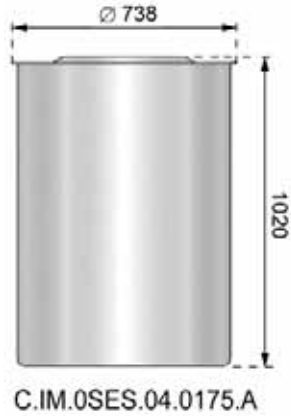


Figure 3.2.9 Fût inox de type EIP

Un huitième sous-ensemble de colis, de fabrication CEA, regroupe des déchets technologiques solides moyennement irradiants issus de cellules blindées, principalement contaminés en émetteurs β - γ . Les déchets sont conditionnés, sous forme compactée, dans des conteneurs en acier de 500 litres (voir Figure 3.2.10). On notera que des évolutions sont intervenues depuis le démarrage de la production des colis concernant (i) la matrice de conditionnement utilisée pour le blocage des déchets dans les conteneurs : d'abord un ciment-bitume, puis un liant hydraulique à partir de 1990, (ii) le matériau constitutif du conteneur : d'abord, un acier non allié, puis un acier inoxydable à partir de 1994.



Figure 3.2.10 Conteneur inox de 500 litres

Dans ce sous-ensemble, les déchets sont constitués de matériaux divers, notamment des métaux, des matières organiques et de la verrerie, mélangés dans un même colis. Les masses des colis finis sont en moyenne de 925 kilogrammes dans le cas d'un blocage des déchets par un liant hydraulique et de 850 kilogrammes pour un blocage avec du ciment-bitume. Compte tenu du contenu chimique des colis, une production d'hydrogène, par radiolyse des matières organiques et l'eau de la matrice de conditionnement, est à considérer. Le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact (5 cm) des colis est de l'ordre de 0,2 Sv/h.

Le neuvième et dernier sous-ensemble de colis de déchets technologiques, de fabrication CEA, regroupe des déchets solides principalement contaminés en émetteurs α . Suivant leurs dimensions, les déchets sont conditionnés, sous une forme compactée ou non, dans des conteneurs en acier non allié de 870 litres (voir Figure 3.2.11). Comme pour les conteneurs précédents en acier de 500 litres, deux matrices de conditionnement des déchets, d'abord un ciment-bitume, puis un liant hydraulique à partir de 1990, ont successivement été mises en œuvre depuis le démarrage de la production des colis. On

notera que ce sous-ensemble de colis regroupe également quelques colis de concentrats cimentés initialement conditionnés en fûts en acier de 700 litres, puis reconditionnés en conteneurs de 870 litres.

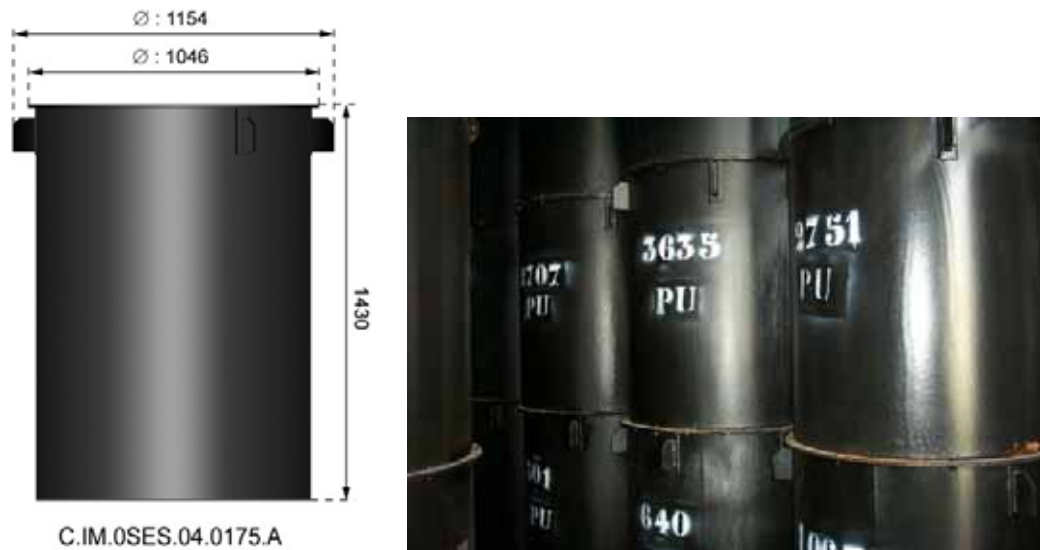


Figure 3.2.11 Conteneur en acier non allié de 870 litres

Les déchets conditionnés sont constitués de matériaux divers (métaux, matières organiques, verres, gravats, ...) mélangés dans un même colis. Les masses moyennes des colis finis varient entre 1,6 et 2,3 tonnes, suivant leur contenu (déchets compactés ou non, fûts reconditionnés). Compte tenu du contenu chimique des colis, on considère ici aussi une production d'hydrogène, par radiolyse des matières organiques et de l'eau de la matrice de conditionnement. Ces colis ne sont pas irradiants.

Les principales caractéristiques des neuf sous-ensembles de colis de déchets technologiques cimentés ou compactés sont récapitulées au Tableau 3.2.1.

Tableau 3.2.1 Récapitulatif des principales caractéristiques des sous-ensembles de colis de déchets technologiques cimentés ou compactés

Sous-ensemble de colis	Volume hors tout du colis (m ³)	Matériau de conteneur	Matrice d'enrobage ou de blocage	Présence de matériaux métalliques	Présence de matériaux organiques
1	1	Béton	Ciment-bitume	Néant	x
2	1,2	Béton fibré ou amiante-ciment	Ciment	x	x
3	1,8 3,2 ou 3,8 en cas de reconditionnement	Béton ou acier non allié	Ciment-bitume ou mortier	x	x
4	0,5	Béton	Ciment	Néant	x
5	1,2	Béton fibré	Mortier	x	x
6	0,18	Acier inoxydable	Néant	x	x
7	0,428	Acier inoxydable	Ciment	Néant	x
8	0,5	Acier non allié ou inox	Ciment-bitume ou liant hydraulique	x	x
9	1,22	Acier non allié	Ciment-bitume ou liant hydraulique	x	x

3.2.1.4 Déchets de structure cimentés ou compactés

Cet ensemble de déchets provient du retraitement des combustibles usés dans les usines COGEMA ; il correspond aux éléments formant l'ossature métallique des assemblages combustibles. Ces déchets sont séparés des matières nucléaires recyclables (uranium, plutonium) et des produits de fission et actinides mineurs, au début du processus de retraitement, lors des opérations de cisailage et de dissolution des combustibles.

Dans le cas des assemblages combustibles des réacteurs à eau pressurisée, ces déchets sont couramment désignés par le terme « coques et embouts ». Les coques correspondent aux gaines des crayons combustibles, récupérées sous la forme de tronçons d'environ trois centimètres de longueur, dans lesquelles le matériau nucléaire a été extrait par dissolution dans l'acide. Les embouts correspondent aux pièces situées aux deux extrémités de l'assemblage combustible.

Les déchets de structure considérés ici sont issus des retraitements réalisés dans les usines de COGEMA La Hague. Ils comprennent (i) les déchets produits lors de retraitements antérieurs de combustibles UNGG et REP, aujourd'hui entreposés dans des silos et piscines, (ii) les déchets résultant des retraitements actuels et futurs des différents types de combustibles REP UOX et MOX, définis dans les scénarios d'étude donnés à la section 3.1.

Les matériaux des déchets de structure sont de plusieurs natures : alliages de magnésium-zirconium et de magnésium-manganèse pour les combustibles UNGG ; alliage de zirconium-étain (zircaloy 4) ou zirconium-niobium (alliage M5), aciers inoxydables et alliage de nickel pour les combustibles REP. Suivant les hypothèses de conditionnement indiquées ci-après, certains colis contiennent aussi des déchets technologiques de nature métallique uniquement (aciers non alliés et inoxydables) ou de nature mixte, métallique et organique. Ces déchets technologiques représentent, en masse, environ dix pour cent de la masse totale de déchets conditionnés par colis.

L'activité radiologique est due (i) aux produits d'activation issus de l'activation neutronique des éléments d'alliage et des impuretés constitutifs des matériaux des éléments de structure des assemblages, lors de leur séjour en réacteur, et répartis dans la masse de ces matériaux, (ii) une contamination par des produits de fission, produits d'activation des impuretés (PAI) et actinides inclus dans la couche oxydée recouvrant la surface interne des tronçons de gaine ayant contenu le combustible. Cette contamination est due aussi aux traces d'indissous pouvant subsister après rinçage des déchets. La contribution radiologique des déchets technologiques présents dans certains colis est négligeable par rapport à celle des déchets de structure.

La thermicité des colis est due, pour l'essentiel, au cobalt 60. Du fait de la décroissance du cobalt, certains colis ne sont plus thermiques, compte tenu de l'âge des déchets. D'autres colis ont un niveau de puissance thermique de l'ordre d'une trentaine de watts, au moment de leur production, mais celui-ci diminue assez rapidement au bout de quelques années, en lien avec la décroissance du cobalt. Cette évolution est représentée à la Figure 3.2.12.

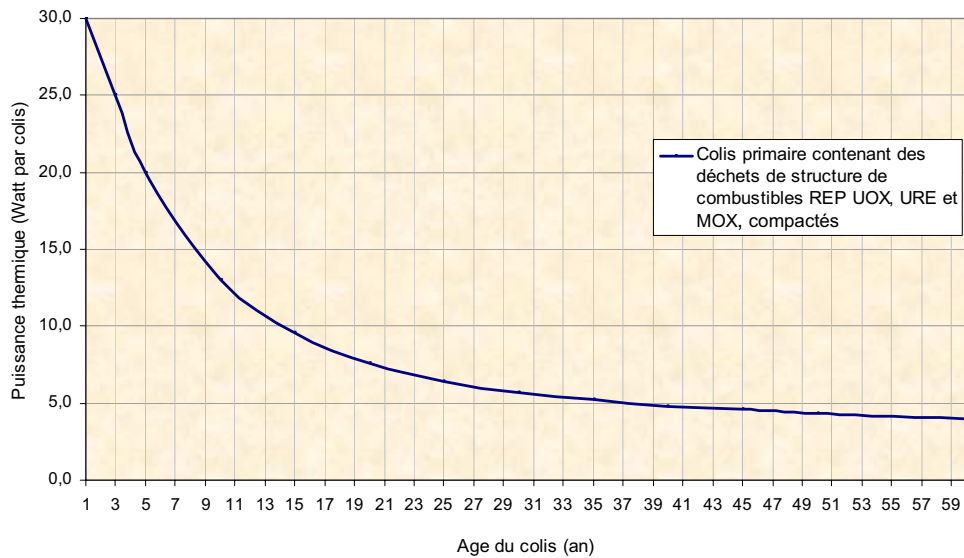


Figure 3.2.12 Evolution de la puissance thermique résiduelle des colis primaires de déchets de structure de combustibles REP UOX, URE et MOX

● **Déchets de structure cimentés**

Le mode initial de conditionnement des déchets de structure des assemblages combustibles REP consistait en une cimentation dans des fûts en acier inoxydable de grand gabarit. Ce procédé a été appliqué entre 1990 et 1995, puis remplacé par un compactage des déchets, mis en œuvre dans l'atelier ACC (Atelier de Compactage des Coques) de La Hague, à partir de 2002.

Les colis produits entre 1990 et 1995 sont appelés *fûts de coques et embouts cimentés* (voir Figure 3.2.13).

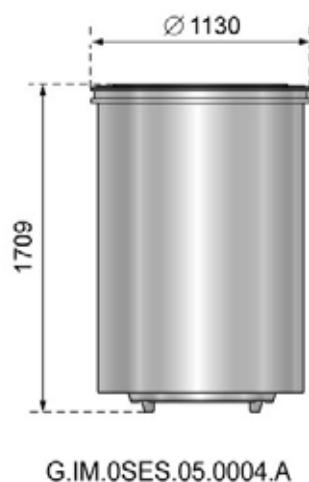


Figure 3.2.13 Fût en inox de 1 800 litres contenant des déchets de structure cimentés

Ils contiennent en moyenne 776 kilogrammes de déchets de structure composés à 80,7 % d'alliage de zirconium-étain (zircaloy 4), 15,9 % d'aciers inoxydables et 3,4 % d'alliage de nickel. La masse des colis (fût+déchets+matrice) est en moyenne de 3,5 tonnes. La puissance thermique résiduelle des colis, due au cobalt 60, est aujourd'hui de l'ordre d'une dizaine de watts. Elle sera de 3 watts environ à l'horizon 2025. Le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact des colis (5 cm) est actuellement

de l'ordre de 4 Sv/h ; il sera de l'ordre de 0,5 Sv/h à l'horizon 2025. La radiolyse de l'eau de la matrice cimentaire induit une production d'hydrogène.

● Déchets de structure compactés

Comme indiqué précédemment, un nouveau procédé de conditionnement des déchets de structure est mis en œuvre depuis 2002 sur le site de La Hague. Il consiste en un compactage des déchets préalablement placés dans des étuis, suivi d'une mise en conteneurs en acier inoxydable (CSD-C). Le procédé de compactage s'applique aux déchets de structure issus des combustibles UNGG et REP retraités antérieurement, aujourd'hui entreposés dans des silos et piscines, ainsi qu'aux déchets de structure issus des retraits des combustibles déchargés actuellement et dans les années futures des réacteurs du parc REP. Comme mentionné ci-avant, certains colis contiennent en plus des déchets technologiques compactés issus de l'exploitation et/ou la maintenance des ateliers du site. Compte tenu de la diversité des flux de déchets considérés et de leurs caractéristiques, quatre sous-ensembles de colis de déchets de structure compactés (CSD-C) peuvent être distingués.

Le premier sous-ensemble de colis contient des déchets de structure issus du retraitement de combustibles UOX, URE et MOX mélangés avec des déchets technologiques de natures métallique et organique. Les hypothèses retenues sont (i) un retraitement des combustibles intervenant en moyenne 8 ans après leur déchargement des réacteurs, (ii) une masse moyenne de déchets conditionnés de 420 kilogrammes par colis (y compris les étuis de compactage). Suivant ces hypothèses, la puissance thermique des colis, calculée pour un inventaire radiologique enveloppe des différents flux de déchets précités, est d'environ 30 watts. La décroissance thermique de ces colis est donnée à la Figure 3.2.12. Le niveau d'irradiation des colis, initialement d'une cinquantaine de sieverts par heure (Sv/h), est de l'ordre de 15 Sv/h, après dix ans de refroidissement. La présence de déchets organiques dans les colis, en provenance des déchets technologiques, conduit à la production d'hydrogène, par radiolyse de ces matières. On notera par ailleurs que des éléments radioactifs tels que le tritium (symbolisé par T ou ^3H), le carbone 14 (^{14}C), le chlore 36 (^{36}Cl), l'argon 39 (^{39}Ar) et le krypton 85 (^{85}Kr) peuvent être relâchés des déchets, sous forme de traces gazeuses. La masse moyenne des colis finis est d'environ 520 kilogrammes.

Le deuxième sous-ensemble de colis contient, comme les colis précédents, un mélange de déchets de structure UOX, URE et MOX et de déchets technologiques. Il diffère du premier par la nature des déchets technologiques, constitués ici de matériaux métalliques seuls. Contrairement aux colis du premier sous-ensemble, ils ne génèrent pas, de ce fait, d'hydrogène par radiolyse. En revanche, le risque de relâchement de traces de gaz radioactifs, par les déchets, subsiste (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{39}Ar et ^{85}Kr). Cela pose la question de leur confinement au plus près des déchets, à laquelle répond le chapitre 4. Les autres caractéristiques des colis (puissance thermique, débit d'équivalent de dose, masse) sont par ailleurs identiques à celles des colis du premier sous-ensemble.

Le troisième sous-ensemble de colis contient uniquement des déchets de structure de combustibles REP retraités dans le passé, aujourd'hui entreposés. La masse des colis est de 725 kilogrammes en moyenne. Compte tenu de l'âge des déchets, les colis ne sont pas thermiques. Leur niveau d'irradiation est d'environ 5 Sv/h ; il sera d'environ 1 Sv/h à l'horizon 2025.

Enfin, le quatrième sous-ensemble de colis contient uniquement des déchets de structure de combustibles UNGG retraités dans le passé, aujourd'hui entreposés. La masse des colis finis est de 350 kilogrammes en moyenne. Compte tenu de l'âge des déchets, les colis ne sont pas thermiques. De même, leur niveau d'irradiation est plus faible que celui des sous-ensembles précédents, à savoir environ 0,4 Sv/h.

Les principales caractéristiques des quatre sous-ensembles de colis de déchets de structure compactés sont récapitulées au Tableau 3.2.2.

Tableau 3.2.2 *Récapitulatif des principales caractéristiques des sous-ensembles de colis de déchets de structure compactés*

Sous-ensemble de colis	Matériaux des déchets de structure	Présence de déchets technologiques	Présence de matières organiques	Production de gaz de radiolyse (H ₂)	Thermicité, niveau d'irradiation à la date de production des colis
1	Alliages de zirconium-étain ou zirconium-niobium, aciers inox, alliage de nickel	x	x	x	Colis faiblement thermiques, fortement irradiants
2	Idem sous-ensemble 1	x	Néant	Néant	Colis faiblement thermiques, fortement irradiants
3	Alliage de zirconium-étain, aciers inox, alliage de nickel	Néant	Néant	Néant	Colis non thermiques, moyennement irradiants
4	Alliages de magnésium-zirconium ou magnésium-manganèse	Néant	Néant	Néant	Colis non thermiques, faiblement irradiants

3.2.1.5 Déchets de structure et technologiques mis en fûts

Cet ensemble de déchets regroupe des déchets produits sur le site de COGEMA Marcoule, aujourd'hui entreposés, hors déchets bitumés et déchets pulvérulents cimentés décrits ci-avant. Il comprend (i) les déchets d'exploitation de l'atelier de vitrification de Marcoule, (ii) des déchets de structure issus des combustibles retraités dans l'usine UP1, (iii) des déchets technologiques d'exploitation et de maintenance des installations du site de Marcoule.

Les déchets sont placés dans des fûts en acier inoxydable. On notera que les modalités de limitation des volumes vides résiduels à l'intérieur des colis primaires n'ont pas été définies à ce stade.

Un premier sous-ensemble de colis contient des déchets technologiques liés à l'exploitation de l'atelier de vitrification de Marcoule (AVM). Les déchets, constitués d'appareillages, d'outillages et de pièces diverses en aciers, sont déposés dans un conteneur en acier inoxydable de géométrie similaire à celle des conteneurs de déchets vitrifiés AVM. La masse des colis est en moyenne de 160 kilogrammes, pouvant atteindre 320 kilogrammes (hors matériau d'immobilisation des déchets). L'activité radiologique correspond à une contamination à la surface des déchets. Ces colis ne sont pas thermiques, leur niveau d'irradiation est d'environ 0,05 Sv/h.

Un deuxième sous-ensemble de colis contient des déchets de structure de combustibles. Le mode de conditionnement prévisionnel est une mise des déchets dans des fûts en acier inoxydable appelés fûts EIP. Les colis sont composés, soit de déchets de structure en aluminium et en acier inoxydable, soit de déchets de structure en alliages de magnésium. La masse moyenne des colis est inférieure à 300 kilogrammes (hors matériau d'immobilisation des déchets). Les colis contenant des déchets de structure en aluminium et en acier ont une puissance thermique de l'ordre de 10 watts, principalement imputable au cobalt 60 ; elle sera de 0,5 watt au maximum à l'horizon 2025. Le niveau d'irradiation des colis est de 25 Sv/h, il sera d'environ 2 Sv/h à l'horizon 2025.

Les colis contenant des déchets de structure en alliages de magnésium ne sont pas thermiques. Leur niveau d'irradiation, imputable aux deux isotopes baryum 137m (^{137m}Ba) et europium 154 (¹⁵⁴Eu), est de 3 Sv/h, il sera d'environ 2 Sv/h à l'horizon 2025.

Un troisième sous-ensemble de colis contient des déchets technologiques constitués, soit d'un mélange de matériaux métalliques et organiques, soit de matériaux métalliques seuls. Le mode de conditionnement prévisionnel est aussi une mise des déchets en fûts EIP.

Les colis contenant des déchets métalliques et organiques ont une masse moyenne de 90 kilogrammes (hors matériau d'immobilisation des déchets). Ils ne sont ni thermiques, ni irradiants. Un dégagement d'hydrogène, par radiolyse des matières organiques, est à prendre en compte.

Les colis contenant des déchets technologiques métalliques seuls ne sont pas thermiques et ne produisent pas de gaz. Leur niveau d'irradiation est d'environ 0,05 Sv/h ; il sera d'environ 0,02 Sv/h à l'horizon 2025. La masse des colis finis est de 240 kilogrammes en moyenne, hors matériau d'immobilisation des déchets.

Les principales caractéristiques des trois sous-ensembles de colis de déchets de structure et technologiques sont récapitulées au Tableau 3.2.3.

Tableau 3.2.3 *Récapitulatif des caractéristiques des déchets de structure et technologiques mis en fûts*

Sous-ensemble de colis	Volume hors tout du colis (m ³)	Présence de déchets métalliques	Présence de déchets organiques	Production de gaz de radiolyse (H ₂)	Thermicité, niveau d'irradiation à la date de production des colis
1	0,175	x	Néant	Néant	Colis non thermiques, faiblement irradiants
2	0,428	x	Néant	Néant	Thermicité nulle ou moyenne, niveau d'irradiation moyen ou fort suivant les colis
3	0,428	x	x	x	Colis non thermiques et non irradiants

3.2.1.6 Sources

Cet ensemble de déchets regroupe des crayons sources REP ainsi que des sources scellées à usage industriel.

Les crayons sources sont des déchets d'exploitation des réacteurs REP, au même titre que les différents déchets métalliques activés décrits au paragraphe 3.2.1.1. Constituant une partie des crayons contenus dans les grappes sources primaires et secondaires, ils servent à élever le niveau de flux à un seuil détectable par les appareils de comptage neutronique, lors du démarrage des réacteurs. Les crayons sources primaires qui contiennent une capsule de californium sont déchargés en fin de premier cycle, tandis que les crayons sources secondaires, constitués d'un mélange d'antimoine-béryllium, subissent plusieurs cycles d'irradiation avant leur mise au rebut. Les grappes sources primaires déchargées des réacteurs 900 MW ont fait l'objet d'un traitement pour récupération des capsules de californium et ne sont donc pas considérées comme des déchets (elles ne sont donc pas considérées dans l'inventaire). La masse totale de déchets à conditionner est inférieure à deux tonnes.

Pour l'étude, l'hypothèse de conditionnement retenue est, comme pour les autres déchets activés REP, un cisailage puis un compactage des crayons sources, avant mise en conteneur de type CSD-C. On notera que le conditionnement des crayons sources conduira au maximum à la production de quatre CSD-C.

Les sources scellées à usage industriel contiennent des matières radioactives de natures, d'activités et de périodes très diverses. Plusieurs milliers de sources ont fait l'objet, entre 1972 et 1985, d'un conditionnement dans des conteneurs en béton, ces derniers étant ensuite reconditionnés dans des conteneurs métalliques. Ces colis dits « blocs sources » sont actuellement entreposés au CEA, sur le site de Cadarache (voir Figure 3.2.14). Ce sont des colis de grand gabarit ; leur masse est comprise entre 6,0 et 9,2 tonnes.



Figure 3.2.14 Blocs sources

Par ailleurs, plusieurs autres milliers de sources scellées sont aujourd'hui entreposées dans différentes installations. Elles couvrent une très large gamme d'isotopes radioactifs, d'activités et de périodes variables. Pour l'étude, il a été retenu de prendre en compte l'ensemble des sources de période supérieure ou égale à celle du césium 137 (période égale à 30 ans), en cohérence avec le domaine de déchets acceptés en stockage de surface au centre de l'Aube. L'hypothèse de conditionnement envisagée au stade actuel est une cimentation des sources dans des fûts de type EIP.

3.2.1.7 Déchets au radium et à l'américium

Cet ensemble regroupe différents types de déchets comprenant des sulfates de plomb radifères, des objets au radium à usage médical (ORUM) et des paratonnerres. La prise en compte de ces déchets dans l'inventaire HAVL reste toutefois exploratoire. *Les sulfates de plomb radifères* proviennent du traitement de minerai d'uranium dans l'usine du Bouchet. Les déchets ont été mis initialement dans des fûts métalliques ; ces derniers ont fait l'objet de reconditionnements successifs, en vue de leur entreposage. Pour les études, l'hypothèse retenue est la reprise des fûts primaires de sulfates de plomb radifères pour un conditionnement dans des fûts de type EIP. On notera que les modalités de limitation des volumes vides résiduels à l'intérieur des colis primaires n'ont pas été définies à ce stade.

Les ORUM sont des aiguilles et tubes métalliques de très petites dimensions, contenant chacun quelques milligrammes de radium. Le radium est incorporé sous une forme chimique solide et insoluble mais pulvérulente (sulfate ou chlorure). L'histoire de l'industrie du radium montre qu'une centaine de grammes de radium a été extraite, dont une cinquantaine de grammes utilisée pour la fabrication d'ORUM. On notera que les ORUM (5 000 objets au total) peuvent tous être conditionnés dans un seul fût EIP.

A titre de précaution, on considère également le cas des *paratonnerres* qui sont des objets contenant soit du radium, soit de l'américium. Le conditionnement retenu, déjà appliqué à quelques paratonnerres au radium, est un compactage, puis une cimentation des têtes des paratonnerres dans des conteneurs en acier non allié de 870 litres. Les colis contiennent en moyenne environ 200 têtes de paratonnerres, de type radium ou de type américium, et ont une activité de l'ordre de 10 gigabecquerels (GBq). Leur masse est de 2 tonnes en moyenne.

3.2.2 Colis primaires de déchets C vitrifiés

Les déchets vitrifiés proviennent du retraitement des combustibles usés. Ce sont, pour l'essentiel, les produits de fission et les actinides mineurs (neptunium, américium et curium) formés par réaction nucléaire et contenus dans les combustibles usés, qui sont séparés de l'uranium et du plutonium lors du retraitement. Ils sont calcinés et incorporés dans une matrice de verre. Le verre élaboré est coulé en température dans un conteneur en acier inoxydable. L'activité radiologique est répartie de manière homogène dans la masse du déchet vitrifié.

En France, la vitrification a été développée dans plusieurs installations pilotes exploitées par le CEA, dont l'installation pilote PIVER aujourd'hui arrêtée, puis mise en œuvre industriellement dans trois ateliers exploités par COGEMA : Atelier de Vitrification de Marcoule (AVM), démarré en 1978, ateliers de vitrification R7 et T7 de La Hague, démarrés respectivement en 1989 et 1992.

Les caractéristiques des déchets vitrifiés, notamment leur activité et leur puissance thermique, dépendent de plusieurs paramètres qui sont : (i) les caractéristiques initiales des solutions de produits de fission et d'actinides mineurs issus des combustibles retraités dans ces installations, (ii) la concentration plus ou moins élevée des produits de fission dans le verre, (iii) l'âge des déchets.

Ainsi, il a été retenu de distinguer plusieurs ensembles de colis de déchets C vitrifiés regroupant respectivement (i) les productions de verres plus anciennes (§ 3.2.2.1), (ii) les productions de verres actuelles ou envisagées à court terme (§ 3.2.2.2), (iii) les productions de verres prévisionnelles, comprenant des verres UOX/MOX et des verres UOX avec une hypothèse d'incorporation d'une faible fraction de plutonium (§ 3.2.2.3).

Les niveaux de puissance thermique associés à ces différents ensembles de colis sont représentés à la Figure 3.2.15.

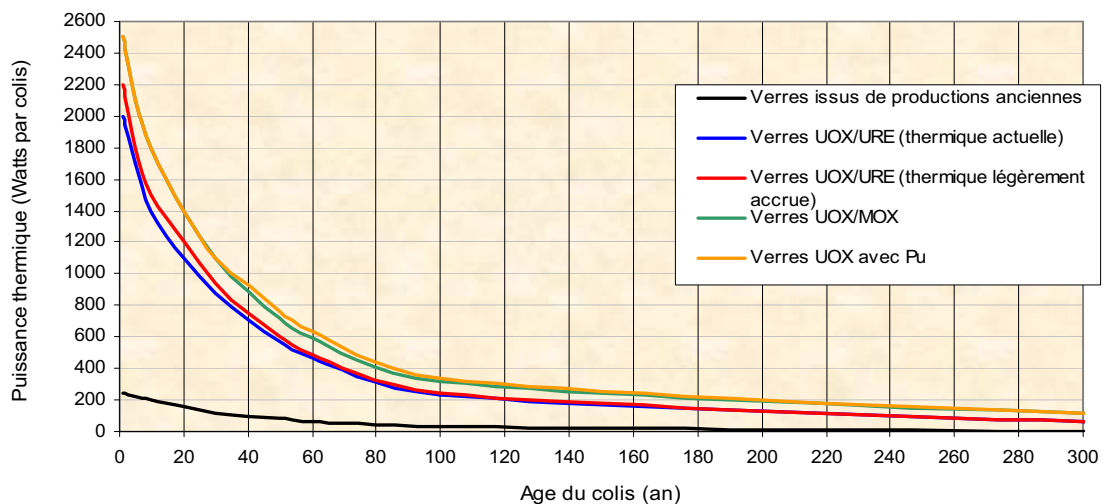


Figure 3.2.15 Puissances thermiques des colis de déchets vitrifiés

3.2.2.1 Colis de verre issus de productions anciennes

Cet ensemble de colis comprend (i) les colis de verres contenant les solutions de produits de fission provenant du retraitement de combustibles issus de réacteurs Uranium naturel-graphite-gaz (combustibles UNGG de type Sicral) et de combustibles issus du réacteur à neutrons rapides Phénix dans l'installation PIVER, (ii) les colis de verres contenant des solutions de produits de fission, dites UMo, provenant des combustibles UNGG retraités antérieurement sur le site de COGEMA La Hague, aujourd'hui entreposées, (iii) les colis de verres produits depuis 1978 dans l'atelier de vitrification de COGEMA Marcoule (verres AVM) contenant les produits de fission et actinides issus, pour l'essentiel, du retraitement de combustibles UNGG. Ces derniers colis sont majoritaires en nombre.

Ces colis se différencient par leur contenu chimique, suivant la composition de la matrice de verre utilisée, leur contenu radiologique et consécutivement leur puissance thermique, et par la géométrie des conteneurs.

Les colis PIVER, produits entre 1969 et 1981, sont composés en majorité de verres UNGG. Le déchet vitrifié est conditionné dans des conteneurs en acier inoxydable de même diamètre, mais de hauteurs différentes (voir Figure 3.2.16).

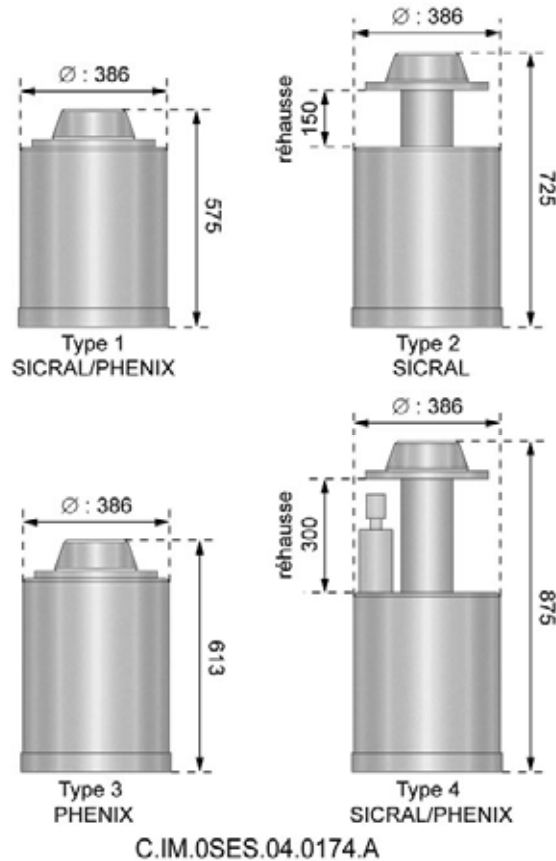


Figure 3.2.16 Conteneurs PIVER

Ce sont des colis de faible capacité (39 litres ou 45 litres suivant le type de conteneur) contenant une masse de verre variant entre 20 et 120 kilogrammes. Pour l'étude, il a été retenu une masse moyenne de 74 kilogrammes de déchet vitrifié par colis et une masse totale de colis plein (déchet vitrifié + conteneur) de 90 kilogrammes en moyenne.

Compte tenu de leur date de production, l'activité radiologique des colis a considérablement décliné. Elle reste dominée par deux produits de fission à vie moyenne, qui sont le strontium 90 (^{90}Sr) et le césium 137 (^{137}Cs). Ceux-ci engendrent un dégagement thermique résiduel, qui est actuellement de l'ordre d'une trentaine de watts par colis. Le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact (5 cm) du colis, est d'environ 70 Sv/h ; il sera d'environ 45 Sv/h à l'horizon 2025.

Les colis de verres UMo correspondent au conditionnement futur de solutions de produits de fission existantes ; ces dernières sont issues de combustibles UNGG retraités dans l'usine UP2-400 de COGEMA La Hague. La nature chimique des solutions nécessite le développement d'une formulation de verre spécifique et des adaptations des équipements du procédé, notamment pour ce qui concerne le four de vitrification. Suivant les hypothèses retenues, la masse moyenne de déchet conditionné est de 400 kilogrammes par colis. Le strontium 90 et le césium 137 contribuent là encore à une part importante de l'activité radiologique des colis, bien que celle-ci ait fortement décliné du fait de l'âge des solutions. Consécutivement, le dégagement thermique résiduel est actuellement d'environ 70 watts par colis. Le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact (5 cm) du colis, est d'environ 15 Sv/h ; il sera d'environ 10 Sv/h à l'horizon 2025.

Ces déchets seront conditionnés dans un conteneur en acier inoxydable identique à celui utilisé aujourd'hui dans les ateliers de vitrification R7 et T7 de COGEMA La Hague. Ce conteneur, dénommé Conteneur Standard de Déchets Vitrifiés (CSD-V), est présenté à la Figure 3.2.17.

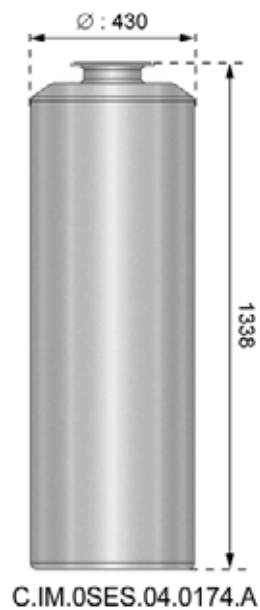


Figure 3.2.17 Conteneur Standard de Déchets Vitriifiés (CSD-V)

Les colis de verres AVM regroupent l'ensemble des déchets vitrifiés produits depuis 1978 dans l'atelier de vitrification de COGEMA à Marcoule. Comme cela a été indiqué plus haut, les solutions vitrifiées proviennent en majorité des combustibles UNGG retraités dans l'usine UP1 du site. On notera l'existence de quatre formulations différentes de verre mises en œuvre pour une ou plusieurs campagnes de vitrification.

Le déchet vitrifié est conditionné dans un conteneur en acier inoxydable présenté à la Figure 3.2.18.

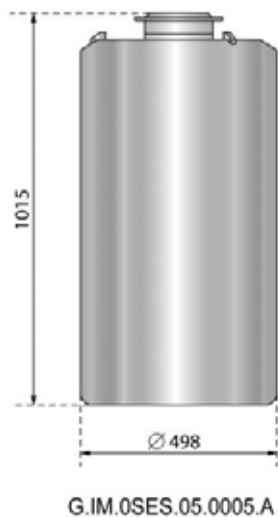


Figure 3.2.18 Conteneurs de déchets vitrifiés AVM

La masse moyenne des colis est de 410 kilogrammes, dont 360 kilogrammes de déchet vitrifié. La puissance thermique des colis provient principalement des produits de fission à vie moyenne, ^{90}Sr et ^{137}Cs . Pour l'étude, on retient une puissance thermique de 155 watts à l'horizon 2025. On notera que cette puissance thermique est plus élevée que celle des colis qui précèdent ; elle est néanmoins nettement inférieure à celle des colis C présentés infra. Le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact (5 cm) du colis, d'environ 235 Sv/h, sera d'environ 150 Sv/h à l'horizon 2025.

3.2.2.2 Colis de déchets vitrifiés issus de productions actuelles ou envisagées à court terme

Ces colis contiennent des solutions de produits de fission issus du retraitement de combustibles REP UOX/URE dans les usines de COGEMA La Hague, conditionnés sous forme de verre dans un conteneur en acier inoxydable dit CSD-V (voir Figure 3.2.17). La production et le conditionnement des déchets sont supposés intervenir après une durée moyenne d'entreposage des combustibles de 8 ans, après leur déchargement des réacteurs. La masse de déchets conditionnés est en moyenne de 400 kilogrammes par colis.

Un premier sous-ensemble de colis correspond, d'un point de vue thermique, aux productions industrielles actuelles. Suivant les hypothèses retenues, le déchet vitrifié est constitué d'un mélange de solutions de produits de fission issus de combustibles UOX1 (taux de combustion moyen de 33 GWj/t), UOX2/URE (taux de combustion moyen de 45 GWj/t) et UOX3 (taux de combustion moyen de 55 GWj/t).

Un deuxième sous-ensemble de colis correspond à des colis de puissance thermique légèrement accrue. Le déchet vitrifié est constitué d'un mélange de solutions de produits de fission issus de combustibles UOX2/URE et UOX3, dont les taux de combustion moyens sont, comme précédemment, de 45 GWj/t et 55 GWj/t respectivement.

Les puissances thermiques de ces colis sont représentées à la Figure 3.2.15 (courbes bleue et rouge). Elles posent la question de la durée d'entreposage avant une mise en stockage, et de la conception de modules de stockage permettant de limiter la température à des niveaux acceptables (voir le chapitre 2) ; cette question est traitée au chapitre 5.

Le débit d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact (5 cm) des colis est d'environ 240 Sv/h, après 60 ans de refroidissement.

3.2.2.3 Colis futurs hypothétiques

Ces colis correspondent à des productions éventuellement envisageables de verres sur le site de COGEMA La Hague. Dans les scénarios retenus pour l'étude, ces colis ont été définis en supposant que la production et le conditionnement des déchets interviennent, comme pour les verres précédents, après une durée moyenne d'entreposage des combustibles de 8 ans, après leur déchargement des réacteurs. On notera que d'autres possibilités pourraient être envisagées.

La masse moyenne de déchets conditionnés est ici aussi de 400 kilogrammes par colis. Les conteneurs sont similaires à ceux présentés ci-dessus (CSD-V).

Un premier sous-ensemble de colis décrit des verres résultant du conditionnement de solutions de produits de fission issus de combustibles UOX et MOX. Ils sont définis comme étant constitués d'un mélange de 15 % de MOX et de 85 % d'UOX2.

Un deuxième sous-ensemble de colis décrit des déchets vitrifiés issus du retraitement de combustibles UOX et qui contiendraient une faible charge supplémentaire en plutonium. Le taux d'incorporation du plutonium dans le verre est fixé à un pour cent massique, soit environ 4 kilogrammes par colis. Le plutonium incorporé proviendrait de combustibles UOX2.

Les puissances thermiques que produiraient ces colis ont été représentées plus haut, à la Figure 3.2.15 (courbes verte et orange).

Les débits d'équivalent de dose β - γ au pseudo-contact (5 cm) des colis seraient respectivement de 235 Sv/h pour les verres UOX/MOX et de 265 Sv/h pour les verres au plutonium, après 60 ans de refroidissement.

3.2.3 Combustibles usés

Les combustibles usés pris en compte sont des combustibles issus du parc de réacteurs REP ainsi que des combustibles issus de filières arrêtées et de réacteurs de recherche (UNGG, EL4), des combustibles issus des activités de la défense nationale. On rappelle que ceux-ci sont pris en compte

dans l'étude dans le cas où ils seraient considérés comme des déchets, supposant un arrêt du retraitement, ce qui n'est pas la stratégie actuellement retenue en France.

Dans le cadre du scénario S2, les typologies de combustibles considérées (voir section 3.1) sont : l'UOX2 et l'URE (45 GWj/t), l'UOX3 (55 GWj/t) et le MOX (48 GWj/t).

Un conditionnement des assemblages a été étudié (voir chapitre 4, §4.3). Ce dernier permet la prise en charge des assemblages nus ou mis préalablement en étui.

3.2.3.1 Assemblages combustibles REP

L'assemblage combustible de référence correspond à un assemblage de conception FRAGEMA « avancée de 2^{ème} génération » à tubes-guides épaissis et à gainage en alliage de zirconium. Il est représenté à la Figure 3.2.19. Il porte la désignation AFA-2GE pour les réacteurs REP 900 MWe et AFA-2LE pour les réacteurs REP 1 300 MWe et 1 450 MWe.

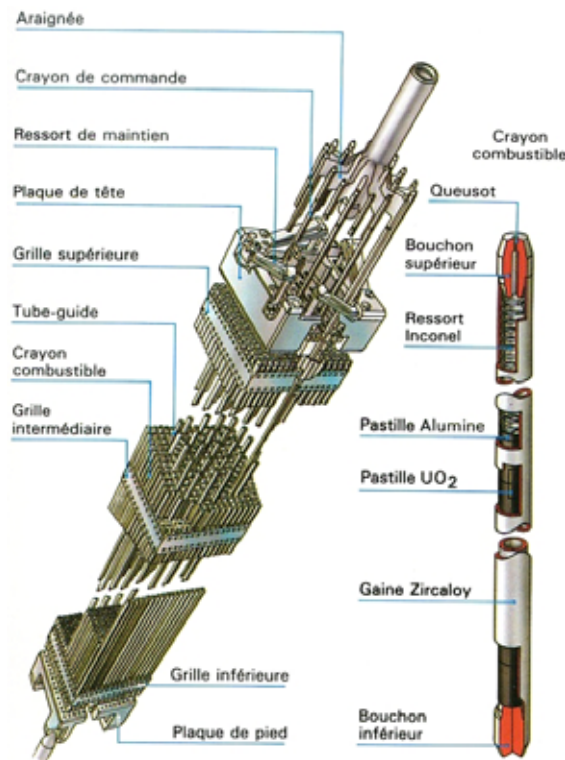


Figure 3.2.19 Assemblage combustible REP

L'assemblage est constitué d'une structure métallique rigide (squelette) qui supporte 264 crayons géométriquement identiques répartis dans un réseau carré de 289 logements.

Le squelette se compose des éléments suivants :

- 2 embouts mécano-soudés, fixés à chaque extrémité des tubes-guides, assurant le positionnement dans le cœur ;
- 24 tubes permettant le guidage des crayons de grappes (tubes-guides) et supportant les grilles qui constituent l'ossature de la structure ;
- 1 tube d'instrumentation central dédié au guidage d'une micro-chambre de mesure de flux ;
- 8 (AFA-2GE) ou 10 (AFA-2LE) grilles d'espacement assurant le maintien axial et radial des crayons par un système ressort-bossette.

Le crayon combustible est constitué :

- d'une gaine métallique cylindrique fermée en parties haute et basse par deux bouchons soudés (le bouchon supérieur présente un queusot, obturé après remplissage du crayon en hélium) ;

- d'un empilement de pastilles combustibles sur environ 95 % de la hauteur du crayon ;
- d'un ressort hélicoïdal en partie supérieure de l'empilement des pastilles combustibles assurant son maintien axial lors des manutentions.

Les assemblages AFA-2GE et AFA-2LE sont de même configuration (réseau 17x17 à pas de 12,6 mm, section 214 mm x 214 mm) mais de longueur totale différente : 4,12 mètres pour AFA-2GE et 4,87 mètres pour AFA-2LE (dimensions après irradiation). Les masses des matériaux varient suivant le type de combustible et le type d'assemblage. Elles sont données au Tableau 3.2.4.

Tableau 3.2.4 Masse des assemblages combustibles REP (par matériau et masse totale)

Assemblage	Masse de matériau par assemblage (en kilogramme)				Masse totale de l'assemblage (en kilogrammes)
	Céramique combustible	Alliage de zirconium (gainage des crayons)	Alliage de nickel (ressorts d'embouts et de grilles)	Acier inox (embouts, ressorts de crayons, etc.)	
AFA-2GE UOX/URE	521,2 (UO ₂)	125,6	2,1	16,4	665
AFA-2LE UOX	608,1 (UO ₂)	146,2	2,5	19,5	775
AFA-2GE MOX	513,9 ((U-Pu)O ₂)	125,6	2,1	18,1	660

Une des problématiques liées aux combustibles vis-à-vis de l'étude de stockage, commune avec les déchets C vitrifiés, est leur dégagement thermique important, en lien avec leur inventaire radiologique. Les différences par rapport aux déchets vitrifiés sont une contribution forte du plutonium à la thermicité des combustibles ; celle-ci se traduit par une phase thermique de plus longue durée, due à la période des isotopes impliqués, principalement l'américium 241 (²⁴¹Am) qui provient par filiation du plutonium 241 (²⁴¹Pu).

L'évolution temporelle de la puissance thermique résiduelle des assemblages UOX et MOX, après leur déchargement des réacteurs, est illustrée à la Figure 3.2.20.

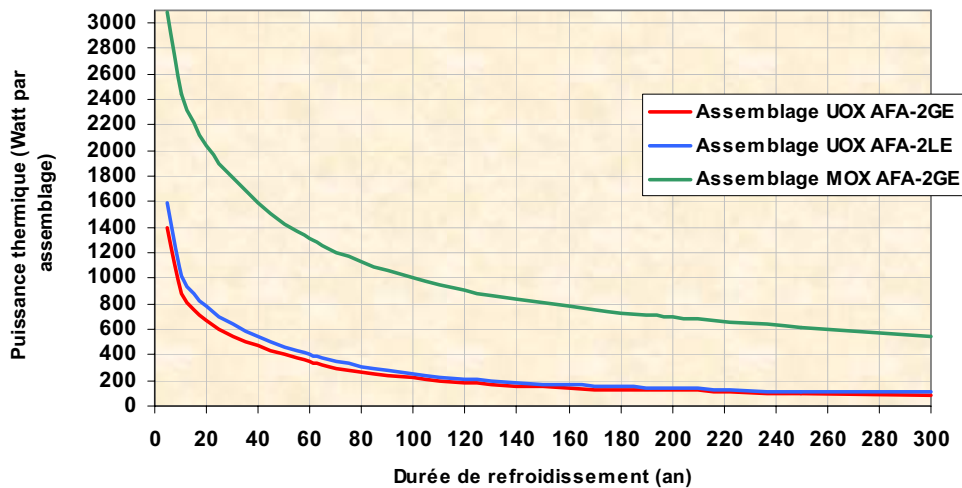


Figure 3.2.20 Evolution de la puissance thermique résiduelle des assemblages combustibles UOX et MOX

Dans la représentation précédente, les puissances thermiques sont déduites des inventaires radiologiques des combustibles UOX et MOX. Pour les assemblages notés UOX AFA-2GE et UOX AFA-2LE, un inventaire enveloppe a été défini pour un mélange de combustibles de type UOX2,

UOX3 et URE. Pour les études, on notera que les colis de stockage de combustibles usés REP regroupent quatre assemblages dans le cas des combustibles UOX AFA-2GE ou UOX AFA-2LE (voir le chapitre 4, §4.3).

3.2.3.2 Combustibles CEA (réacteurs de recherche et Défense nationale)

Les combustibles CEA, considérés en marge des scénarios décrits plus haut, sont de natures assez diverses. Ils comprennent (i) des combustibles issus de réacteurs UNGG, (ii) des combustibles issus du réacteur à eau lourde EL4, (iii) des éléments combustibles issus des réacteurs Célestin implantés à Marcoule et (iv) des combustibles de la propulsion nucléaire provenant de réacteurs à terre ou embarqués dans des navires.

Les combustibles UNGG correspondent à un tonnage résiduel de combustibles non retraités, d'environ 15 tonnes. Ils sont actuellement conditionnés dans des étuis cylindriques de diamètre 88 mm ou 130 mm et de hauteur égale à 655,5 mm. Ces étuis contiennent une très faible masse de déchets, soit en moyenne 9 kilogrammes ou 18 kilogrammes suivant le type d'étui. Leur puissance thermique est particulièrement faible, soit environ 3 watts au maximum.

Les combustibles EL4 représentent environ 50 tonnes de métal lourd. L'élément combustible se présente sous la forme d'une grappe composée de 19 crayons enserrés dans une structure en ATR (alliage de zirconium avec du cuivre et du molybdène). Les crayons, constitués d'une gaine métallique en alliage de zirconium-cuivre, contiennent des pastilles d'oxyde d'uranium très faiblement enrichi en uranium 235 (1,28 % ou 1,41 % suivant les crayons). La masse initiale d'oxyde d'uranium est de 10,6 kilogrammes par grappe. Les grappes de combustibles EL4 sont actuellement conditionnées dans des étuis en acier inoxydable d'environ 100 mm de diamètre et 1 100 mm de longueur. Chaque étui contient deux grappes placées l'une sur l'autre. Leur puissance thermique est aussi très faible (au maximum 10 watts par étui).

Les éléments combustibles Célestin sont constitués de plaques métalliques contenant de l'uranium enrichi, montées sur une structure métallique. Ils seraient conditionnés dans des étuis en acier inoxydable d'environ 340 mm de diamètre et 1 100 mm de longueur. Chaque étui contiendrait six éléments combustibles représentant une puissance thermique totale de 120 watts au maximum.

Les combustibles de la propulsion nucléaire sont constitués (i) de combustibles oxydes à base de plaquettes d'oxyde fritté d'uranium, (ii) de combustibles métalliques à base d'uranium métallique très enrichi. Ces derniers combustibles ne sont plus utilisés.

Dans les deux cas, le combustible se présente sous la forme d'un assemblage composé de plusieurs faisceaux. Ces derniers seraient séparés de l'assemblage et conditionnés dans des étuis de même diamètre (340 mm environ, comme les étuis contenant des éléments combustibles Célestin) mais de longueurs variables, adaptées aux dimensions des faisceaux. Chaque étui contiendrait quatre ou six faisceaux issus d'assemblages combustibles de même type. La puissance thermique serait ici au maximum du même ordre de grandeur que celle des colis de déchets vitrifiés AVM décrits supra (155 watts).

3.3 Le modèle d'inventaire

L'ensemble des données précédentes et des hypothèses sur les colis primaires ont été structurées dans un « modèle d'inventaire », pour en permettre une utilisation systématique dans l'étude.

Dans ce modèle d'inventaire, la diversité des colis primaires, présentée à la section 3.2, est organisée au moyen d'une structure arborescente. Celle-ci regroupe les colis primaires présentant des problématiques semblables. Pour couvrir les caractéristiques des colis primaires ainsi regroupés, le modèle d'inventaire définit des « colis types » représentatifs de ces regroupements.

La nomenclature arborescente adoptée pour identifier les colis types sera utilisée dans l'ensemble des chapitres suivants. Elle se décline sur trois niveaux. Le premier niveau distingue, de manière classique, les différentes catégories de colis (déchets B, déchets C et combustibles usés repérés par les lettres

« CU ») qui présentent des problématiques propres, du fait de leur contenu radiologique (en nature et en quantité) et des conséquences sur le plan thermique (niveau de dégagement thermique et évolution dans le temps). Au sein de chacune de ces catégories, notamment pour les déchets de catégorie B, différents types de colis sont identifiés en fonction des natures de déchets (boues, déchets technologiques, déchets de structure d'assemblages combustibles, etc.) et des modes de conditionnement mis en oeuvre (compactage, bitumage, cimentation). Pour certains colis de niveau 1, une déclinaison sur un, voire deux niveaux supplémentaires, permet de décrire finement la variabilité des colis primaires, pour les besoins d'études de conception, de modélisation et d'évaluation de sûreté du stockage. Les critères pris en compte pour différencier les colis types de niveau 2, ou de niveau 3, sont les caractéristiques physico-chimiques du déchet conditionné (en lien avec les matériaux des déchets et des matrices de conditionnement), les niveaux de puissance thermique et d'irradiation des colis (en lien avec l'inventaire radiologique), les caractéristiques des conteneurs (dimensions, matériaux). Ainsi pour les colis types regroupant une grande diversité de familles de colis primaires, ce qui est par exemple le cas du colis type B3, un niveau 2 d'arborescence distingue les natures des matériaux de colisage (béton, acier) et le caractère homogène ou non des déchets conditionnés.

Les caractéristiques physico-chimiques du déchet conditionné interviennent fortement sur les choix de conception de manière à placer les colis dans des conditions d'environnement favorables qui limitent leur altération dans le temps. Elles déterminent la capacité de confinement initiale et à long terme des colis ainsi que les perturbations potentiellement induites par la dégradation des colis. Ces perturbations comprennent (i) le relâchement de produits susceptibles d'accroître la solubilité des radionucléides ou d'en complexer une partie notable, (ii) la production de gaz par radiolyse ou par corrosion des matériaux, (iii) la formation d'espèces potentiellement agressives pour les matériaux environnants. En particulier, les colis contenant des déchets de nature organique sont identifiés. Les dégagements gazeux sont des données d'entrée pour l'étude de la ventilation des installations, celle des colis de stockage, ainsi que pour l'analyse des risques en phase d'exploitation et d'observation.

Les caractéristiques (dimensions, masses, organes de préhension) des conteneurs sont des paramètres importants pour la conception des colis de stockage, des architectures et des moyens d'exploitation.

Les données thermiques permettent (i) un dimensionnement thermique du stockage, (ii) une évaluation de son comportement. Le niveau d'irradiation des colis intervient dans le dimensionnement des moyens de radioprotection, suivant les objectifs de radioprotection retenus.

Pour chaque colis type, le modèle d'inventaire définit les nombres de colis primaires pris en compte dans l'étude, et leur volume total, pour chacun des scénarios S1a,b,c et S2 introduits à la section 3.1.

3.3.1 Choix des colis types, nomenclature utilisée dans la suite

Les différents ensembles de colis primaires, présentés à la section 3.2, se distinguent par (i) le niveau de dégagement thermique des colis (déchets B de thermicité nulle à modérée, déchets C vitrifiés et combustibles usés de thermicité supérieure), (ii) les natures et les modes de conditionnement des déchets.

Les possibilités de regroupement de colis ont ainsi conduit à identifier seize colis types, au premier niveau de l'arborescence du modèle d'inventaire ; cela comprend :

- huit colis types de déchets B, notés B1 à B8, correspondant aux paragraphes 3.2.1.1 à 3.2.1.7, en distinguant les déchets de structure cimentés des déchets de structure compactés (§ 3.2.1.4) ;
- cinq colis types de déchets C vitrifiés, notés C0 (§ 3.2.2.1), C1 et C2 (§ 3.2.2.2), C3 et C4 (§ 3.2.2.3) ;
- deux colis types de combustibles usés REP, notés CU1, CU2 (en distinguant les combustibles UOX et MOX, § 3.2.3.1) auxquels s'ajoute le colis type CU3 (regroupant l'ensemble des autres combustibles, qui présentent un dégagement thermique nettement plus faible).

Comme indiqué plus haut, ces colis types se subdivisent dans certains cas, en colis types de niveau 2 et de niveau 3.

Ainsi, les colis types B2.1 et B2.2 distinguent des colis de géométries différentes.

Pour le colis type B3, regroupant une grande diversité de familles de colis, la déclinaison des colis s'effectue sur deux niveaux. Au niveau 2, les regroupements des colis ont été définis sur la base des matériaux utilisés pour les conteneurs, et du caractère homogène ou hétérogène du déchet conditionné :

- B3.1 : déchets hétérogènes contenus dans des enveloppes béton ;
- B3.2 : déchets homogènes contenus dans des enveloppes béton ;
- B3.3 : déchets hétérogènes contenus dans des enveloppes métalliques.

La déclinaison en colis types de niveau 3 correspond à la prise en compte des natures chimiques des déchets, du risque de production d'hydrogène et des dimensions des colis (les colis types de niveau 3 associés respectivement aux colis types de niveau 2 : B3.1, B3.2 et B3.3 sont classés par ordre croissant de taille) :

- B3.1.1, B3.1.3, B3.2.1, B3.2.2, B3.3.2 : colis générant potentiellement de l'hydrogène ;
- B3.1.2, B3.3.1, B3.3.3, B3.3.4 : colis contenant des matières organiques et générant de l'hydrogène.

Les colis types B5 sont différenciés suivant les natures de déchets et leurs caractéristiques associées (chimiques, radiologiques, thermiques) :

- B5.1/B5.2 : ces colis types se distinguent des autres déchets de structure conditionnés en CSD-C par leur thermicité plus importante et aussi par la présence de déchets technologiques. Ainsi, ces colis types permettent d'étudier deux populations potentiellement différentes de CSD-C en fonction de leur contenu en déchets technologiques : le colis type B5.1 couvre des déchets technologiques contenant des matières organiques, le colis type B5.2 n'en contenant pas ;
- B5.3 : il s'agit de déchets de structure seuls, sans matière organique, de très faible thermicité des déchets du fait de leur âge ;
- B5.4 : ce colis type se distingue par la nature des déchets (magnésiens), l'absence de matière organique, l'absence de thermicité.

Les colis types B6 sont différenciés suivant les natures et matériaux de déchets et les géométries d'enveloppes :

- B6.1 : géométrie d'enveloppe différente de celle des colis types B6.2 à B6.5 (les enveloppes des B6.2 à B6.5 sont identiques) ;
- B6.2 : déchets de structure constitués d'acier, de zircaloy et d'alliage de nickel ;
- B6.3 : déchets de structure magnésiens ;
- B6.4 : colis contenant des déchets technologiques organiques et générant de l'hydrogène ;
- B6.5 : colis contenant des déchets technologiques métalliques seuls.

Les colis types B7 et B8 sont différenciés également suivant les natures de déchets et les matériaux et géométries d'enveloppes.

Les colis types C0.1, C0.2 et C0.3 séparent les colis types C0 suivant les natures et compositions chimiques des déchets vitrifiés, leurs caractéristiques radiologiques et thermiques, et les caractéristiques dimensionnelles des colis.

La liste des colis types et leurs intitulés sont donnés au Tableau 3.3.1. Les paragraphes de la section précédente auxquels renvoient ces colis types sont précisés.

Tableau 3.3.1 Liste des colis types du modèle d'inventaire

Colis types	Cat.	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Intitulés des déchets regroupés dans les colis types	Description	
Déchets activés	B	B1			CSD-C contenant des déchets activés des réacteurs REP et RNR	§ 3.2.1.1	
Déchets bitumés		B2	B2.1			Fûts bitumes 238 et 245 litres	§ 3.2.1.2
			B2.2			Fûts bitumes 428 litres	§ 3.2.1.2
Déchets technologiques et divers cimentés ou compactés		B3	B3.1	B3.1.1		Conteneurs béton 1 000 litres reconditionnés ou non en conteneurs métalliques	§ 3.2.1.3
				B3.1.2		Conteneurs en béton (CAC et CBF-C'2) contenant des déchets technologiques divers	§ 3.2.1.3
				B3.1.3		Conteneurs béton 1 800 litres contenant des déchets divers	§ 3.2.1.3
			B3.2	B3.2.1		Conteneurs béton 500 litres (boues et concentrats)	§ 3.2.1.3
				B3.2.2		Conteneurs béton de 1 200 litres (CBF-C'2) contenant des déchets CEDRA et AGATE	§ 3.2.1.3
			B3.3	B3.3.1		Conteneurs standard de déchets compactés (CSD-C) contenant des déchets alpha	§ 3.2.1.3
		B3.3.2			Fûts EIP contenant des déchets de pulvérulents cimentés	§ 3.2.1.3	
		B3.3.3			Conteneurs en acier de 500 litres contenant des déchets divers	§ 3.2.1.3	
Déchets de structure cimentés		B4			Fûts de coques et embouts cimentés	§ 3.2.1.4	
Déchets de structure avec ou sans déchets technologiques, compactés		B5	B5.1			CSD-C contenant un mélange de coques et embouts et de déchets technologiques (y compris déchets organiques)	§ 3.2.1.4
			B5.2			CSD-C contenant un mélange de coques et embouts et de déchets technologiques métalliques	§ 3.2.1.4
			B5.3			CSD-C contenant des déchets de structure REP (HAO), sans déchet technologique	§ 3.2.1.4
			B5.4			CSD-C contenant des déchets de structure magnésiens	§ 3.2.1.4
Déchets de structure et technologiques mis en fûts		B6	B6.1			Conteneurs en acier de 180 litres contenant des déchets d'exploitation AVM	§ 3.2.1.5
			B6.2			Fûts EIP contenant des déchets de structure métalliques	§ 3.2.1.5
			B6.3			Fûts EIP contenant des déchets de structure magnésiens	§ 3.2.1.5
			B6.4			Fûts EIP contenant des déchets technologiques métalliques et organiques	§ 3.2.1.5
			B6.5			Fûts EIP contenant des déchets technologiques métalliques	§ 3.2.1.5
Sources	B7	B7.1			Blocs sources	§ 3.2.1.6	
		B7.2			CSD-C contenant les crayons sources primaires et secondaires REP	§ 3.2.1.6	
		B7.3			Fûts EIP contenant des sources scellées	§ 3.2.1.6	
Déchets au radium et à l'américium	B8	B8.1			Fûts EIP contenant des fûts de sulfates de plomb radifères	§ 3.2.1.7	
		B8.2			Conteneurs en acier de 870 litres contenant des têtes de paratonnerres au radium ou à l'américium	§ 3.2.1.7	
		B8.3			Fûts EIP contenant des ORUM	§ 3.2.1.7	
Déchets vitrifiés	C0	C0.1			Déchets vitrifiés PIVER	§ 3.2.2.1	
		C0.2			Déchets vitrifiés UMo	§ 3.2.2.1	
		C0.3			Déchets vitrifiés AVM	§ 3.2.2.1	
	C1			Déchets vitrifiés UOX/URE « thermique actuelle »	§ 3.2.2.2		
	C2			Déchets vitrifiés UOX/URE « thermique future »	§ 3.2.2.2		
	C3			Déchets vitrifiés UOX/MOX	§ 3.2.2.3		
	C4			Déchets vitrifiés UOX + Pu	§ 3.2.2.3		

A ces colis types de déchets s'ajoute l'étude des combustibles types suivants

Combustibles REP EDF	CU	CU1			Combustibles usés REP UOX et URE	§ 3.2.3.1
		CU2			Combustibles usés REP MOX	§ 3.2.3.1
Combustibles CEA	CU3	CU3.1			Combustibles usés UNGG et EL4	§ 3.2.3.2
		CU3.2			Combustibles usés Célestin	§ 3.2.3.2
		CU3.3			Combustibles usés de la propulsion nucléaire	§ 3.2.3.2

3.3.2 Nombre et volume de colis primaires pris en compte

Dans le cadre donné par les scénarios présentés à la section 3.1, la quantification du nombre de colis types s'appuie sur les inventaires et prévisions de production de déchets établis par les producteurs, évalués par l'Andra sur la base des données produites.

Pour les déchets à produire, hors retraitement des combustibles usés, des marges de dimensionnement ont été ajoutées par l'Andra, de manière à prendre en compte les incertitudes. Il est à noter que des possibilités éventuelles de stockage de certains colis de déchets dans le cadre d'autres solutions de stockage n'ont pas été prises en compte de manière à disposer d'estimations prudentes.

Pour les productions passées, les inventaires reposent sur les données établies par les producteurs. Pour ce qui concerne les déchets de retraitement, leurs inventaires se déduisent de l'hypothèse de production électrique du parc.

Les nombres et volumes de colis pris en compte dans les études, pour les déchets B, sont présentés au Tableau 3.3.2 et au Tableau 3.3.3. Les nombres et volumes de colis types C sont donnés au Tableau 3.3.4. Les volumes indiqués correspondent aux volumes de déchets conditionnés avec les hypothèses formulées ci-dessus.

Tableau 3.3.2 *Données quantitatives globales, en nombres et volumes de colis, pour les colis types de déchets B*

Colis type	Sites de production	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
		Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)
B1	EDF	2 560	470	2 560	470	2 560	470	2 560	470
B2	COGEMA La Hague	42 000	10 000	42 000	10 000	42 000	10 000	42 000	10 000
	COGEMA Marcoule	62 990	26 060	62 990	26 060	62 990	26 060	62 990	26 060
Total B2		104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060
B3	CEA	15 060	13 370	15 060	13 370	15 060	13 370	15 060	13 370
	COGEMA La Hague	9 890	10 470	9 890	10 470	9 890	10 470	7 340	7 750
	COGEMA Marcoule	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420
Total B3		32 940	27 260	32 940	27 260	32 940	27 260	30 390	24 540
B4	COGEMA La Hague	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730
B5	COGEMA La Hague	42 600	7 790	39 900	7 300	39 900	7 300	13 600	2 490
B6	COGEMA Marcoule	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580
B7	EDF/CEA/Andra	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440
B8	CEA/Andra	1 350	775	1 350	775	1 350	775	1 350	775

Tableau 3.3.3 Détail des nombres et volumes des colis types B2, B3, B5, B6, B7 et B8

Colis type	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
	Nombre	Volume (m3)	Nombre	Volume (m3)	Nombre	Volume (m3)	Nombre	Volume (m3)
B2.1	46 930	11 210	46 930	11 210	46 930	11 210	46 930	11 210
B2.2	58 060	24 850	58 060	24 850	58 060	24 850	58 060	24 850
Total B2	104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060
B3.1.1	90	90	90	90	90	90	90	90
B3.1.2	8 690	10 250	8 690	10 250	8 690	10 250	6 440	7 590
B3.1.3	180	690	180	690	180	690	180	690
Total B3.1	8 960	11 030	8 960	11 030	8 960	11 030	6 710	8 370
B3.2.1	5 730	2 800	5 730	2 800	5 730	2 800	5 730	2 800
B3.2.2	1 260	1 490	1 260	1 490	1 260	1 490	1 260	1 490
Total B3.2	6 990	4 290	6 990	4 290	6 990	4 290	6 990	4 290
B3.3.1	1 200	220	1 200	220	1 200	220	900	160
B3.3.2	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420
B3.3.3	1 700	850	1 700	850	1 700	850	1 700	850
B3.3.4	6 100	7 450	6 100	7 450	6 100	7 450	6 100	7 450
Total B3.3	16 990	11 940	16 990	11 940	16 990	11 940	16 690	11 880
Total B3	32 940	27 260	32 940	27 260	32 940	27 260	30 390	24 540
B5.1	7 940	1 450	7 400	1 350	7 400	1 350	2 140	390
B5.2	31 760	5 810	29 600	5 420	29 600	5 420	8 560	1 570
B5.3	2 500	460	2 500	460	2 500	460	2 500	460
B5.4	400	70	400	70	400	70	400	70
Total B5	42 600	7 790	39 900	7 300	39 900	7 300	13 600	2 490
B6.1	180	30	180	30	180	30	180	30
B6.2	930	400	930	400	930	400	930	400
B6.3	7 550	3 230	7 550	3 230	7 550	3 230	7 550	3 230
B6.4	1 200	510	1 200	510	1 200	510	1 200	510
B6.5	950	410	950	410	950	410	950	410
Total B6	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580
B7.1	41	155	41	155	41	155	41	155
B7.2	4	0,7	4	0,7	4	0,7	4	0,7
B7.3	3 000	1 285	3 000	1 285	3 000	1 285	3 000	1 285
Total B7	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440
B8.1	1 100	470	1 100	470	1 100	470	1 100	470
B8.2	250	305	250	305	250	305	250	305
B8.3	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4
Total B8	1 350	775	1 350	775	1 350	775	1 350	775

Tableau 3.3.4 Données quantitatives globales, en nombres et volumes de colis, pour les colis types de déchets C

Colis type	Sites de production	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
		Nombre	Volume (m3)	Nombre	Volume (m3)	Nombre	Volume (m3)	Nombre	Volume (m3)
C0.1	CEA	180	10	180	10	180	10	180	10
C0.2	COGEMA La Hague	800	140	800	140	800	140	800	140
C0.3	COGEMA Marcoule	3 140	550	3 140	550	3 140	550	3 140	550
Total C0		4 120	700	4 120	700	4 120	700	4 120	700
C1	COGEMA La Hague	4 640	810	4 640	810	38 350	6 710	4 640	810
C2	COGEMA La Hague	990	170	27 460	4 810	0	0	5 920	1 040
C3	COGEMA La Hague	13 320	2 330	0	0	0	0	0	0
C4	COGEMA La Hague	13 250	2 320	0	0	0	0	0	0

Le Tableau 3.3.5 fournit un état à fin 2003 des volumes de déchets B et C existants, sous forme conditionnée ou non, et des volumes de déchets restant à produire, dans le cas du scénario S1a.

Tableau 3.3.5 Etat à fin 2003 des volumes de déchets B et C produits, conditionnés ou non, et à produire (cas du scénario S1a)

	Colis type	Volume de déchets produits à fin 2003 (m ³)		Volume de déchets à produire (m ³)
		Conditionné	Non conditionné	
B	B1	0	250	220
	B2	27 790	7 620	650
	B3	13 895	4 910	8 455
	B4	2 730	0	0
	B5	135	530	7 125
	B6	0	4 580	0
	B7	155	1 285	0
	B8	15	760	0
Volume total de déchets B (m ³)		44 720	19 935	16 450
C	C0	540	140	20
	Autres verres	880	0	4 750
	Volume total de déchets C (m ³)		1 420	140

Les données quantitatives relatives aux combustibles REP sont fournies au Tableau 3.3.6.

Tableau 3.3.6 Nombre d'assemblages combustibles REP

	Sites de production	Nombre d'assemblages combustibles REP			
		Scénario S1a	Scénario S1b	Scénario S1c	Scénario S2
Assemblage UOX AFA-2GE « court » de type CU1	EDF	0	0	0	27 200
Assemblage UOX AFA-2LE « long » de type CU1		0	0	0	26 800
Total assemblages UOX de type CU1		0	0	0	54 000
Assemblage MOX AFA-2GE « court » de type CU2	EDF	0	5 400	5 400	4 000
Total assemblages MOX de type CU2		0	5 400	5 400	4 000

Par ailleurs, le nombre d'étuis primaires considérés pour les combustibles de type CU3, le cas échéant, est de 5 810.

3.4 Hypothèses de flux de réception de colis primaires

Pour étudier les moyens d'exploitation d'un éventuel stockage, ainsi que les galeries et les puits d'accès, des hypothèses de flux de colis réceptionnés sur le site d'un stockage ont été établies, en cohérence avec les quantités totales de colis inventoriés.

En référence, un rythme de réception de 5 000 colis primaires par an a été envisagé pour les déchets B. Il correspondrait à une durée cumulée de mise en stockage des colis inventoriés sur une quarantaine d'années. A l'exception de certains colis produits tardivement, en particulier le colis type B1, on notera que la totalité ou une grande partie des autres colis types auront déjà été produits à l'horizon 2020.

Chronologiquement, les premiers colis de déchets C vitrifiés qui seraient disponibles au plan technique pour une mise en stockage, eu égard à leur puissance thermique, seraient des colis types C0. Un rythme de 400 colis par an a été retenu comme hypothèse, qui correspondrait à une résorption des entrepôts sur une dizaine d'années.

Les autres colis C vitrifiés (C1, C2, C3 et C4 du scénario S1a, C1 et C2 des scénarios S1b et S2, C1 uniquement dans le scénario S1c), supposent une période d'entreposage avant leur stockage, pour permettre une décroissance de leur puissance thermique. Des études présentées au chapitre 5, il ressort qu'une durée raisonnable d'entreposage serait de 60 à 70 ans, dans le cadre des concepts étudiés et des critères thermiques considérés aujourd'hui.

En tout état de cause, l'hypothèse d'un rythme de réception de 600 colis types C1 à C4 par an (700 colis par an pour les colis types C1 dans le cas du scénario S1c) permettrait de résorber les entrepôts au fur et à mesure que les colis qui s'y trouvent présenteront, du fait de la décroissance radioactive, une même puissance thermique. Cela correspondrait à une résorption des entrepôts sur une cinquantaine d'années.

Les combustibles de type CU2 inventoriés dans les scénarios S1b, S1c et S2 seraient réceptionnés le cas échéant après une durée d'entreposage estimée aujourd'hui au minimum à 90 ans, selon un rythme de 150 assemblages par an. Leur résorption s'effectuerait sur une quarantaine d'années dans le cas des scénarios S1b et S1c (ou une trentaine d'années pour le scénario S2). Enfin pour les combustibles de type CU1 (scénario S2), une hypothèse de 1 650 assemblages par an est considérée dans l'étude.

On notera que pour les combustibles de type CU3, un rythme de réception de 400 étuis primaires par an serait envisageable : il correspondrait à une résorption des entrepôts sur une quinzaine d'années.

4

Les colis de stockage

4.1	Les colis de stockage de déchets B.....	106
4.2	Les colis de stockage de déchets C.....	128
4.3	Les colis de stockage de combustibles usés.....	144

L'objet du présent chapitre est double. D'une part, il précise les motivations d'un complément de colisage des déchets B et C ainsi que les fonctions d'un conteneur de stockage de combustibles usés. D'autre part, il en expose les principes de conception et justifie leur réalisme en termes de fabrication, de manutention et de performances.

Les motivations de la conception de colis de stockage renvoient tout d'abord à la fiabilité et à la standardisation des équipements de manutention dans les installations souterraines. Elles sont également liées à la contribution que peut offrir le colis de stockage à une gestion réversible du stockage. De ce point de vue, il apparaît en effet possible de conférer aux colis des performances de durabilité qui préserveront la possibilité de retirer les déchets stockés. Enfin, les colis de stockage participent aux fonctions de sûreté sur le long terme, notamment en matière de protection des déchets vis-à-vis de phénomènes d'altération et de maîtrise du relâchement des radionucléides.

Ce chapitre expose les solutions de colisage étudiées pour chaque catégorie de déchets. Il montre qu'un complément de colisage en béton, regroupant plusieurs colis primaires, apporte une réponse adaptée aux déchets B. En revanche, il expose en quoi un conteneur métallique apparaît plus pertinent pour les déchets C ou les combustibles usés. L'acier offre en effet une résistance élevée à la température, et peut assurer de manière fiable une étanchéité totale à l'eau sur de grandes durées.

Ce chapitre fournit également les résultats du programme de réalisation de démonstrateurs de colis de stockage en vraie grandeur pour les déchets B et les combustibles usés.

4.1 Les colis de stockage de déchets B

Les déchets B se présentent sous la forme de colis primaires très variés par leur taille, leur forme, leurs caractéristiques et leur dispositif de manutention.

Les objectifs de compacité, de facilité de gestion et de gestion réversible du stockage ont conduit à poser la question d'un complément de colisage pour les déchets B permettant de simplifier les processus d'exploitation opérationnelle dans les installations souterraines.

Les réflexions ont été menées en liaison avec le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) ; en effet, celui-ci traite une problématique comparable pour l'étude d'un entreposage de longue durée (ELD). Elles ont abouti à la solution commune d'un conteneur d'entreposage pour la longue durée et de stockage. On notera que cela ouvre la possibilité de recevoir, sur un site de stockage, des déchets se présentant d'ores et déjà sous la forme de colis « d'entreposage et de stockage », telle que présentée dans la suite, plutôt que sous la forme des colis primaires décrits au chapitre 3.

4.1.1 Exposé des questions principales

4.1.1.1 Intérêt d'un complément de colisage pour les déchets B

Le chapitre 2 a introduit la recherche de compacité de l'architecture de stockage (§ 2.4.1.4). Cette recherche a conduit à concevoir des alvéoles de stockage dans lesquelles les colis de déchets occupent au mieux le volume excavé, en étant placés au plus près les uns des autres. Cela conditionne fortement le processus de mise en place des colis.

La plupart des colis de déchets B sont irradiants (cf. § 3.2.1). Pour protéger les personnes du rayonnement émis par les déchets, une épaisseur importante de matériaux est nécessaire pour atténuer suffisamment ce rayonnement (par exemple une épaisseur métrique de béton). Dans les alvéoles, l'interposition de structures qui assureraient une protection biologique au plus près des colis ne permettrait pas d'optimiser l'utilisation du volume excavé.

Aussi l'Andra a retenu des alvéoles irradiantes : dès qu'un premier colis de déchets est introduit, la présence d'opérateurs dans la plupart des alvéoles est proscrite. Les opérations qui se déroulent dans ces alvéoles doivent donc être commandées de manière automatique ou à distance.

Le choix d'alvéoles irradiantes renforce l'intérêt de rendre les opérations souterraines aussi simples que possible : il s'agit de faciliter l'automatisation des actions répétitives, en particulier la mise en place des colis, et de réaliser ces opérations avec une grande sûreté de fonctionnement. En cas de problème technique, une intervention humaine sera rendue difficile voire impossible, par le rayonnement ; une telle intervention s'effectuera donc à distance, par téléopération.

Pour la mise en alvéole des colis, la recherche de simplicité et de fiabilité suppose deux conditions : (i) des flux réduits d'objets à manutentionner (ii) peu de diversité physique des objets introduits dans une même alvéole.

Par ailleurs, les vides résiduels dans les alvéoles après la mise en place des colis de déchets demandent à être minimisés ou comblés. En effet, la résorption à terme de ces vides est susceptible d'induire des déformations dans les argilites, que l'on cherche à limiter pour contenir l'extension d'une zone d'argilite potentiellement fissurée au voisinage de l'alvéole.

Des colis de géométrie simple et régulière, de grande taille, et qui minimisent les jeux nécessaires à leur manutention, pourront éviter une opération de comblement ; cela permet de simplifier les opérations à réaliser tout en maîtrisant les déformations dans l'argilite.

Enfin, des processus de mise en place simples, et la possibilité de ne pas avoir à combler les vides résiduels entre les colis, constituent deux facteurs particulièrement favorables à la réversibilité, facilitant le retrait de colis stockés.

Or, dans l'ensemble, les colis primaires de déchets B ne réunissent pas ces conditions favorables à la compacité et à la réversibilité d'un stockage. D'une part, ils se caractérisent par un nombre et des flux importants (les déchets B représentent environ 200 000 colis primaires, pour un volume de 80 000 mètres cubes, voir section 3.4 et[3]). D'autre part, du fait de leurs provenances diverses, et de l'histoire des installations qui les ont produits, les colis primaires de déchets B ont des caractéristiques très variées (voir section 3.2 et[3]). À titre d'exemple, les diamètres et les hauteurs des colis primaires varient respectivement de 0,4 m à 1,6 m et de 0,7 m à 1,7 m. Leur masse est comprise entre 0,3 et 9 tonnes. Les matériaux des colis sont aussi divers que l'acier noir, l'acier inoxydable ou le béton. Enfin, il existe plus d'une dizaine de systèmes de préhension spécifiques à chaque installation d'origine, dont certains ne sont pas compatibles avec un objectif de limitation des jeux de manutention.

Aussi l'intérêt premier d'un complément de colisage des déchets est de simplifier et de rendre plus fiable la mise en stockage des déchets, ainsi que leur retrait éventuel : d'une part, un regroupement des plus petits colis primaires dans des colis de stockage de plus grande capacité réduit les flux d'objets transférés en puits et galeries, puis manutentionnés dans les alvéoles ; d'autre part, le complément de colisage standardise les dimensions et les modes de préhension de ces objets. Il permet de minimiser les vides résiduels dans l'alvéole, pour limiter les déformations à long terme dans l'argilite. Enfin, il peut aussi contribuer à la réversibilité par le choix de matériaux peu altérables en condition de stockage, qui faciliteraient un retrait éventuel sur une durée d'ordre à minima séculaire.

4.1.1.2 Autres questions relatives à la conception du colis de stockage

La conception du complément de colisage doit prendre en compte diverses questions liées à la sûreté opérationnelle et à long terme.

● Gestion des gaz produits par les déchets

Les matières organiques contenues dans certains déchets, le bitume d'enrobage des colis types B2 (cf. § 3.1.2) ainsi que l'eau constitutive des mortiers et bétons d'un grand nombre de colis primaires (cf. § 3.2), subissent un phénomène de radiolyse. Ce phénomène est provoqué par les radiations émises par les radionucléides contenus des déchets ; il se traduit par une lente production de gaz, principalement de l'hydrogène. Une telle production existe dans les colis types B2, B3, B4, B5.1, B6.4, B7.1, B8.1 et B8.2. Il faut alors éviter que l'hydrogène produit ne puisse s'accumuler dans le colis de stockage. Pour ce faire, le colis de stockage doit permettre l'évacuation de l'hydrogène produit par les déchets concernés.

Par ailleurs, certains déchets peuvent dégager des traces de gaz radioactif tel que tritium (^3H), krypton 85 (^{85}Kr), chlore 36 (^{36}Cl), radon 222 (^{222}Rn), iode 129 (^{129}I) ou argon 39 (^{39}Ar) ou éventuellement carbone 14 (^{14}C). Cela concerne notamment les colis types B1 et B5 (cf. 3.2). Il convient d'en prévenir autant que possible la dissémination. Dès lors que le colis ne risque pas de produire d'hydrogène par radiolyse (comme les colis type B5.2 en particulier), on cherche à confiner ces gaz au plus près de la source. Pour cela, certains conteneurs primaires comme les CSD-C (B1 et B5.2) peuvent être rendus étanches avant leur mise en colis de stockage, par soudure d'un bouchon sur leur évent²³.

● **Gestion des situations accidentelles**

Le comportement des colis vis-à-vis de situations accidentelles lors de la mise en stockage doit aussi être pris en compte. A cet égard, le colis de stockage pourra contribuer à limiter la dispersion des matières radioactives en cas de chute ou d'incendie.

● **Maîtrise des interactions chimiques à long terme**

A plus long terme, il faut vérifier que les interactions chimiques entre les matériaux constitutifs du complément de colisage, les déchets proprement dits, et l'argilite, sont maîtrisées.

Dans les colis types B2, les déchets, qui se présentent sous la forme de sels, sont intimement mélangés à une matrice bitume. Dans ce cas, les radionucléides qu'ils contiennent seraient relâchés de façon concomitante à la reprise d'eau de l'enrobé bitumineux, à la solubilisation des sels et à la diffusion des sels dans la zone perméable. Pour favoriser la durabilité de l'enrobé bitumineux un domaine de pH compris entre 7 et 12,5 est recherché [40]²⁴.

Pour d'autres colis types, B1, B4, B5, B6 et B7, une partie des radionucléides présents résultent de l'activation des métaux constitutifs des déchets. Ces produits d'activation se trouvent physiquement à l'intérieur du métal ; leur relâchement hors du déchet est alors concomitant à la corrosion du métal. Cette corrosion pourra être ralentie par un pH basique [40].

Plus généralement, un pH basique dans l'alvéole est favorable à la rétention de certains éléments (nickel, américium, curium), au travers d'une diminution de leur solubilité.

● **Température**

Certains déchets B présentent une faible exothermicité, liée essentiellement aux produits d'activation. La puissance thermique des colis types B4 et B6 au moment de leur mise en stockage est inférieure à 5 watts par colis primaires (voire même très inférieure pour certains B3 et B2 notamment). Les colis types B1 et B5 sont les plus exothermiques. Leur puissance, au moment de leur mise en stockage, peut varier de 5 à 15 watts par colis primaire. Il convient alors de vérifier que la compacité de stockage, liée à la fois à la conception des colis de stockage et à leur agencement dans les alvéoles, ne conduise à une température excessive au regard de la capacité à décrire l'évolution des matériaux (voir le chapitre 5).

Ainsi, en ce qui concerne les déchets de type B2, la capacité de confinement est liée au maintien de l'intégrité mécanique de l'enrobé bitumineux. Or les caractéristiques rhéologiques de l'enrobé bitumineux ne sont conservées que si la température de celui-ci reste inférieure à 30 °C. On notera toutefois que ce critère n'a concrètement que peu d'influence sur la conception du colis de stockage, du fait du très faible dégagement thermique de ces colis.

²³ Cette action peut être réalisée en sortie d'entreposage industriel ou en entrée des installations de surface du stockage, elle est compatible avec la faible production de gaz de radiolyse attendu dans ces colis (pas de matière organique).

²⁴ Cela correspond au domaine de validité des modèles retenus pour décrire l'évolution de ces colis et le relâchement des éléments radioactifs.

● Sûreté-criticité

Certains déchets B (notamment les colis types B3, B4, B5 et B6) sont issus du traitement de combustibles usés et contiennent donc des traces de matières fissiles. La conception du stockage doit garantir la sous-criticité en toute situation. De ce point de vue, les colis types B5 sont apparus comme les plus dimensionnants au regard de leur contenu potentiel en matière fissile. Comme dans le cas des phénomènes thermiques, la conception des colis est du point de vue de l'objectif de sous-criticité liée à celle de l'alvéole, notamment en termes d'espacement entre les colis (voir le chapitre 5).

4.1.1.3 Exploration de la possibilité de mobiliser une capacité de rétention du colis de stockage

Une analyse de la répartition de l'activité radiologique dans les déchets B montre l'intérêt, pour certains déchets, d'étudier la possibilité de mobiliser le colis de stockage pour la rétention de certains produits d'activation ou de fission à vie longue (niobium 94 (^{94}Nb), zirconium 93 (^{93}Zr), césium 135 (^{135}Cs)...). Une telle performance sur le long terme (à l'échelle de 10 000 ans) peut être intéressante notamment pour les colis types B5.2 (coques et embouts sans matière organiques) et B1 (déchets activés), qui représentent une part importante de l'inventaire des déchets B pour les radionucléides mentionnés ci-dessus ; on notera que ces colis primaires ne nécessitent pas que les conteneurs de stockage soient perméables au gaz (voir supra) car ils ne contiennent pas de matière organique (voir section § 3.2).

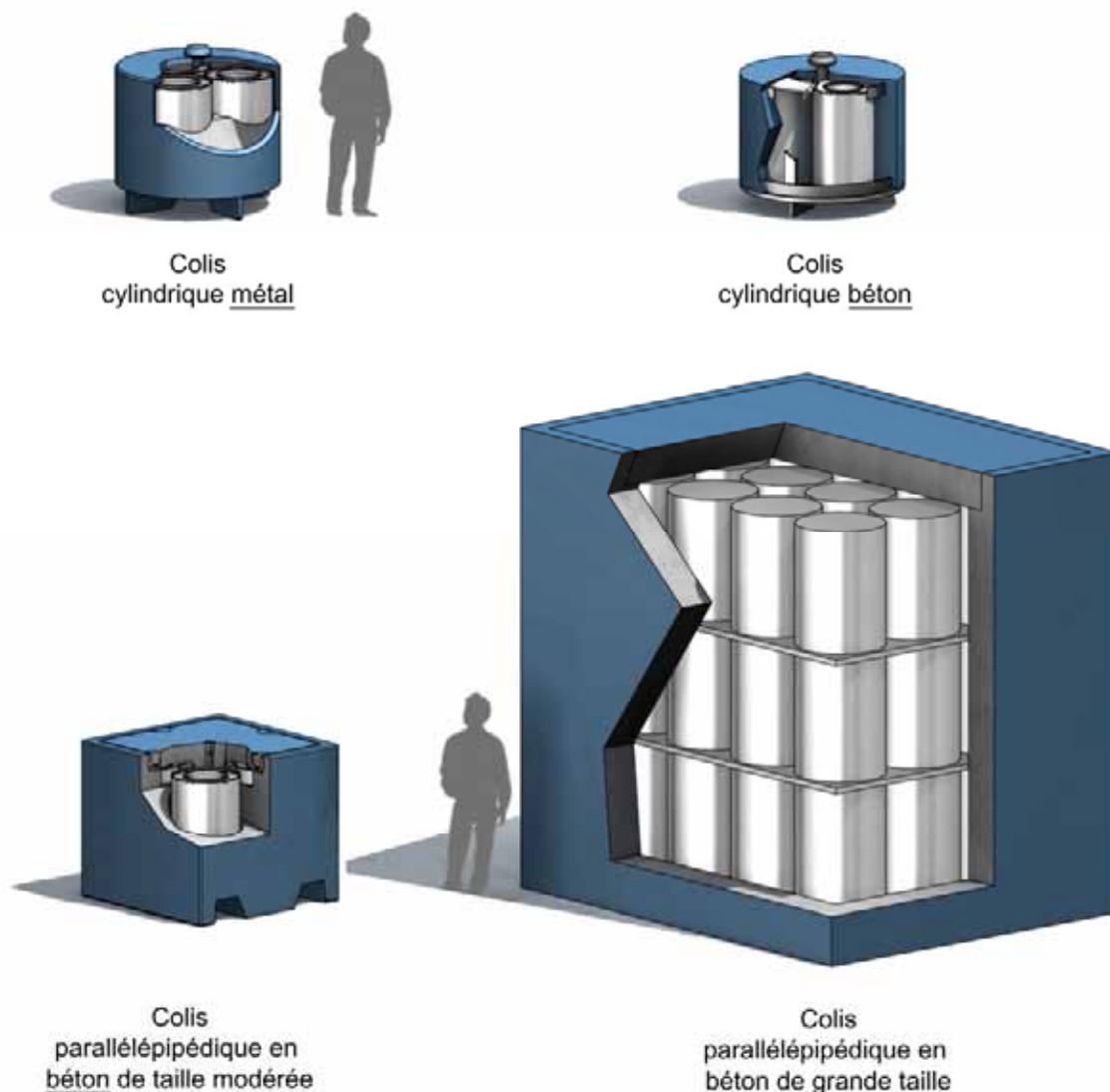
Pour être effective, cette fonction allouée au colis suppose des caractéristiques mécaniques accrues. L'évolution de l'alvéole de stockage et sa mise en charge mécanique progressive doivent alors être prises en compte dans le dimensionnement du colis.

4.1.2 Principes de conception retenus

La conception du colis de stockage est liée à celle de l'alvéole de stockage et de l'équipement de manutention associé. En effet, le système « colis - alvéole - manutention » constitue un ensemble dont le besoin de cohérence est justifié autant par les besoins de sûreté d'exploitation et de réversibilité que de sûreté à long terme.

4.1.2.1 Options de complément de colisage envisagées

Plusieurs paramètres clés président à l'identification d'options techniques pour un complément de colisage des déchets B. La forme du colis de stockage peut être cylindrique ou parallélépipédique. Le matériau constitutif du colis peut être du béton ou un métal. La taille et la masse du colis peuvent être limitées pour permettre notamment un empilement sur plusieurs niveaux dans l'alvéole de stockage ou au contraire non contraintes dans le cadre d'un stockage sans empilement. Les combinaisons possibles de ces paramètres sont illustrées par les quatre options présentées à la Figure 4.1.1 :



C.IM.0SES.04.0505.C

Figure 4.1.1 Options envisagées pour le colis de stockage de déchets B

● **Option « colis cylindrique en métal »**

Dans cette première option, un panier métallique cylindrique constitue l'ossature du colis. Les vides internes sont comblés par du béton. Ce colis est empilable. Dans l'exemple de colis bitumés (type B2.1) un tel colis de stockage contenant trois colis primaires aurait une masse d'environ quatre tonnes, pour un diamètre extérieur d'environ 1,4 mètre et une hauteur de 1,3 mètre.

● **Option « colis cylindrique en béton »**

Cette option consiste en un panier en acier permettant d'accueillir trois colis primaires qui sont noyés dans du béton. La quantité d'acier est minimisée. Ce colis est empilable. Dans l'exemple de colis bitumés (type B2.1) un tel colis de stockage contenant trois colis primaires aurait une masse d'environ trois tonnes, pour un diamètre extérieur d'environ 1,4 mètre et une hauteur de 1,3 mètre.

- **Option « colis parallélépipédique en béton de taille modérée »**

Cette option consiste en une boîte parallélépipédique en béton de dimension modérée et munie de logements cylindriques ajustés aux colis primaires. Dans l'alvéole de stockage, ce colis peut être empilé sur plusieurs niveaux. Dans le cas des colis bitumés type B2.1, un tel colis de stockage, regroupant quatre colis primaires, présente des dimensions proches de celles d'un cube de 1,5 mètre de côté, et une masse de 7 tonnes environ.

- **Option « colis parallélépipédique en béton de grande taille »**

Cette option consiste en une grande boîte parallélépipédique en béton, non empilable dans l'alvéole.

L'épaisseur de la paroi externe pourrait être dimensionnée pour réduire le débit de dose au contact à une valeur compatible avec la présence d'opérateurs auprès des colis de stockage ; cette option a ainsi permis à l'Andra d'examiner une alternative à des alvéoles irradiantes, tout en s'inscrivant dans une recherche de simplification des processus opérationnels.

Dans l'exemple des colis bitumés type B2.1, un tel colis de stockage, non irradiant, contenant 60 colis primaires (superposés sur trois niveaux) présenterait une masse de l'ordre de 110 tonnes. Ses dimensions seraient de 4,4 mètres en longueur, 3,7 mètres en largeur et 3,9 mètres en hauteur.

4.1.2.2 Comparaison des options

- **Forme du colis de stockage**

Une forme cylindrique présente l'inconvénient principal de laisser des vides résiduels relativement importants entre les colis de stockage, même lorsque ceux-ci sont positionnés au contact les uns des autres. En revanche, une forme parallélépipédique permet de répondre plus favorablement au souci de compacité et de minimisation des vides. La régularité du jeu compris entre les colis après leur mise en place limite le taux de vide et évite une opération de remblayage. Ce dernier point suppose que le colis de stockage soit un objet massif, limitant les vides internes autour des colis primaires.

- **Matériau constitutif du colis de stockage**

Dans toutes les options présentées plus haut, les colis primaires sont entourés de béton. Il s'agit d'un matériau se prêtant à une utilisation en grand volume, à la fois résistant et de densité relativement faible.

Une question porte sur l'intérêt d'ajouter une enveloppe métallique, telle la première option ci-dessus. Vis-à-vis de l'intégrité mécanique du colis, un tel ajout ne se justifie pas, au vu de la durabilité et de la résistance d'un béton. Vis-à-vis du confinement des radionucléides gazeux que certains colis primaires pourraient dégager, une telle option pourrait être efficace ; toutefois une fermeture étanche du conteneur primaire apparaît plus simple.

On notera que l'environnement alcalin induit 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 afin de rester dans le domaine de validité des modèles décrivant le relâchement. De plus, la formulation du béton doit limiter la quantité d'eau et de matières organiques contenues dans le béton, au regard notamment du mécanisme de radiolyse et de la production induite de gaz (hydrogène).

- **Dimensions et masse**

Des conteneurs de grande taille présentent plusieurs avantages. Ils permettent de réduire le nombre d'objets à gérer en souterrain et de minimiser les flux de transfert en alvéole. De plus, ces colis n'étant pas empilés dans l'alvéole, la hauteur de survol reste toujours faible lors des manutentions. Le risque de chute est donc pratiquement inexistant. Enfin, s'ils intègrent une protection biologique comme dans l'option présentée plus haut, ils évitent l'utilisation de hotte de transfert dans les galeries de liaison, et l'installation d'un sas de radioprotection en tête d'alvéole.

Cependant, ils sont moins favorables que des conteneurs empilables au regard de la recherche de compacité. Leur gabarit peut conduire à augmenter la section des galeries d'accès aux alvéoles et constitue aussi un handicap pour le transfert au fond par un puits.

Des colis de dimensions modérées, de par leur caractère empilable, permettent d'optimiser la forme géométrique de l'ensemble « alvéole – colis », d'où une plus grande compacité de stockage. Ils sont plus adaptés à une descente au fond par un puits, et permettent d'optimiser la section des galeries d'accès.

4.1.2.3 La solution retenue

L'option retenue est un conteneur en béton de forme parallélépipédique. Sa masse reste inférieure à 25 tonnes environ. Il permet de regrouper jusqu'à 4 colis primaires par colis de stockage [41].

La géométrie externe du conteneur est standardisée. Sa largeur et sa hauteur sont limitées à une valeur de 2,5 mètres. Sa longueur (dimension transverse à l'alvéole) peut, pour certains colis primaires, dépasser 2,5 mètres sans excéder 3 mètres. Il est empilable sur plusieurs niveaux dans l'alvéole de stockage.

La forme parallélépipédique permet de minimiser les vides résiduels externes tout en facilitant un éventuel retrait avec les moyens de manutention simples et robustes utilisés pour la mise en place. A l'intérieur du colis de stockage, la conception en béton massif rend pratiquement négligeables les vides résiduels autour des colis primaires.

Le choix du béton assure une intégrité mécanique sur une durée d'ordre minima séculaire au regard d'un éventuel retrait des colis.

Pour les colis primaires dégageant de l'hydrogène par radiolyse, le risque d'accumulation excessive dans le conteneur peut être évité par la réalisation d'évents dans le complément de colisage. On notera de plus que, tant que le béton se trouve en atmosphère sèche, la seule porosité du béton permettrait une évacuation suffisante de l'hydrogène.

Enfin, le colis de stockage n'est pas dimensionné pour assurer la protection biologique vis-à-vis de l'exposition externe aux rayonnements.

● **Regroupement des colis primaires et standardisation des conteneurs de stockage**

La standardisation des colis de stockage répond au besoin de simplicité et fiabilité de l'exploitation et de limitation du flux de colis à manutentionner, en respectant les possibilités de regroupement des colis dans les alvéoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et radioactives. Elle permet de stocker la totalité et la diversité des déchets B de l'inventaire présenté au chapitre 3 selon sept classes dimensionnelles de colis de stockage.

La majorité des colis de stockage (plus de 80 %) ont des dimensions standardisées en longueur et en hauteur entre 1,5 et 2,1 mètres. Ces colis de stockage contiennent tous 4 colis primaires.

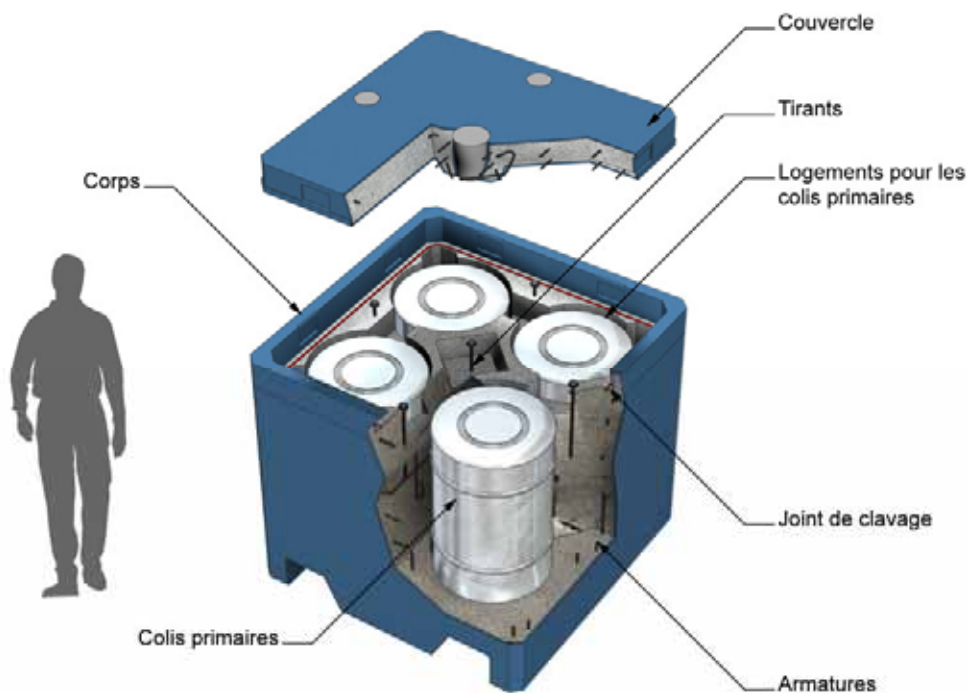
Les autres colis de stockage (moins de 20 %) ont des dimensions plus importantes. Leur longueur est comprise entre 2,5 et 2,9 mètres et leur hauteur est comprise entre 1,7 et 2,4 mètres. Ces colis de stockage contiennent quatre colis primaires ou seulement un ou deux dans le cas de colis primaires de grandes dimensions.

● **Constitution d'un conteneur de stockage standard**

Une option de réalisation d'un tel conteneur de stockage est constitué (Figure 4.1.2) de deux éléments préfabriqués en béton : un corps et un couvercle. Le corps est doté de cloisons internes qui ménagent des logements ajustés à la forme des colis primaires. 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. Cette approche favorise la possibilité de reprise des colis primaires. Après l'introduction des colis primaires, le couvercle rapporté

s'encastre dans le corps du conteneur. On notera que d'autres options de fermeture des colis seraient également envisageables.

Le principe de manutention des conteneurs de stockage en alvéole a été choisi en cohérence avec l'objectif de minimisation de la section d'alvéole et de limitation des vides. La manutention par pont ou portique a donc été éliminée, car elle nécessiterait, en partie supérieure de l'alvéole, un volume qui ne pourrait pas être utilisé pour le stockage. Le principe retenu est une préhension par le dessous à l'aide d'un engin du type « chariot élévateur à fourches » (voir section 9.3.2), impliquant de ménager des réservations à la base du conteneur.



C.IM.0SES.04.0506.B

Figure 4.1.2 Conteneur de stockage standard (illustration pour colis type B2)

- **Variante visant la possibilité de mobiliser la capacité de rétention du béton du colis de stockage**

Il a également été étudié la possibilité de réaliser une variante à ce conteneur, qui mobiliserait sur le long terme la capacité de rétention du béton du colis de stockage (Cf. § 4.1.1.3.). Cette variante ne concerne que les colis primaires ne dégageant pas d'éléments gazeux (hydrogène en particulier).

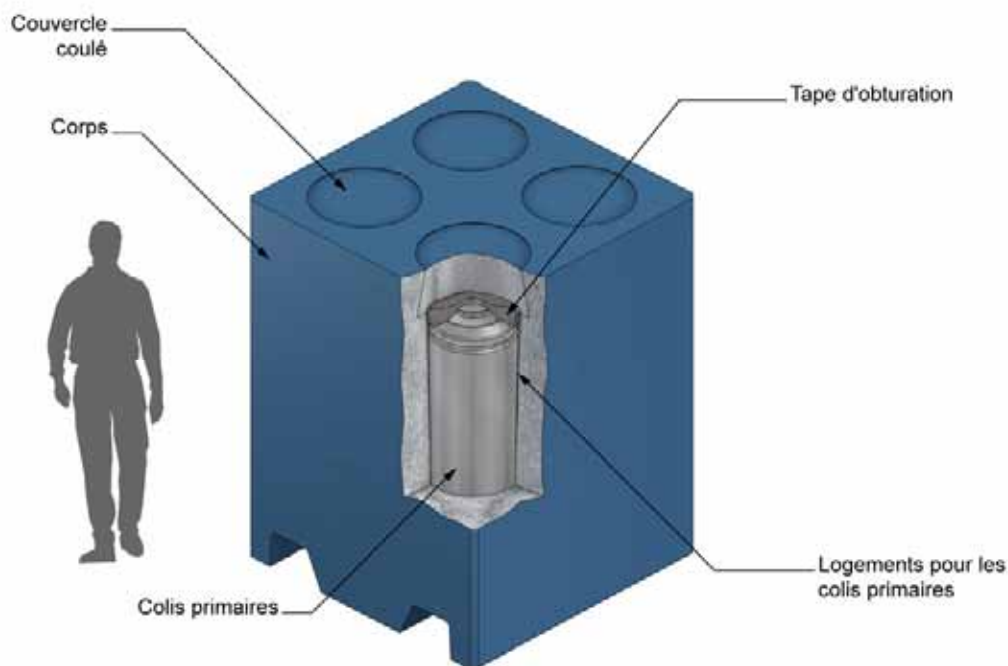
Cette variante assurerait ainsi une fonction de retard à la migration des radionucléides pendant une très longue période (échelle de plusieurs milliers d'années). L'atteinte de cette performance nécessite une faible perméabilité, un faible coefficient de diffusion à l'échelle du colis, mais également une intégrité mécanique à long terme. Cela induit la recherche d'un béton compact (faible porosité). En effet, la dégradation du béton est d'autant plus faible que l'eau et les espèces dissoutes y circulent difficilement.

Un mode de réalisation possible pour cette variante (Figure 4.1.3) comprend, comme le colis standard, un corps préfabriqué avec des logements ajustés aux dimensions des colis primaires. Cependant, le couvercle préfabriqué du colis standard est remplacé par des couvercles (ou bouchons) coulés dans chaque logement individuel après la mise en place des colis primaires.

Les performances du conteneur de stockage à long terme découlent non seulement de l'épaisseur et des performances du béton utilisé, mais aussi de la qualité de la liaison entre le corps et le couvercle coulé.

De ce dernier point de vue, l'adoption de couvercles de petites dimensions adaptées à chaque logement (diamètre de l'ordre de 600 mm) permet de limiter les problèmes de retrait et de fissuration.

Les dimensions et la masse de cette variante sont proches de celles d'un colis standard.



C.IM.0SES.04.0507.B

Figure 4.1.3 Conteneur de stockage à capacité de rétention renforcée (illustration pour colis type B5)

4.1.2.4 Comparaison avec les options étudiées dans d'autres pays

La solution retenue par l'Andra peut être rapprochée de concepts de colisage des déchets B étudiés au Japon et en Suisse.

● Options étudiées au Japon (RWMC)

L'agence japonaise RWMC conduit un programme de recherche et développement relatif au conditionnement en colis de stockage des déchets équivalents à la catégorie française B notamment les déchets bituminés et les coques et embouts. Trois concepts de colis de stockage sont étudiés en parallèle :

- un colis en béton de forme parallélépipédique ;
- un colis en acier au carbone (un de forme cylindrique et un de forme parallélépipédique) ;
- un colis avec un revêtement en alliage de Titane.

Pour le concept de colis en béton, RWMC a formulé deux types de besoins conduisant à deux variantes de ce colis.

La première variante (« package 1 »[42]) répond à un besoin d'intégrité mécanique pendant environ 100 ans. Ce colis de stockage est constitué d'une boîte préfabriquée en béton armé munie d'un couvercle tenu par des tirants. À l'intérieur du colis de stockage les colis primaires de déchets sont posés au contact les uns des autres, et les vides internes sont comblés par un mortier de remplissage doté d'une porosité permettant la circulation de l'hydrogène. Ses dimensions correspondent à un cube d'environ 2 mètres de côté. Sa masse varie de 30 à 35 tonnes selon le type de déchet. Il contient seize conteneurs primaires (CSDC) ou 18 fûts d'enrobés bituminés de 220 litres (9 fûts superposés sur 2 niveaux).

La deuxième variante (« package 2 » [43]) est relative uniquement aux coques et embouts compactés (CSD-C). Elle répond à un besoin de confinement pour une durée de 60 000 ans. Le colis de stockage considéré est constitué d'un casier métallique, contenant 6 colis primaires, coulé au sein d'un monolithe en béton fibré ultra hautes performances (BUHP à 200 MPa). Les vides internes au casier métallique sont comblés. Ses dimensions correspondent à un cube d'environ 1,8 mètre de côté. La masse est de 13 tonnes. Le colis est dimensionné pour résister à une contrainte isostatique de 13,5 MPa.

Ce concept a donné lieu à un programme de démonstration technologique. Des monolithes sans fissure avec des colis de déchets factices non irradiants ont été réalisés à échelle réduite (600 mm) par coulée continue de béton ultra haute performance (BUHP).

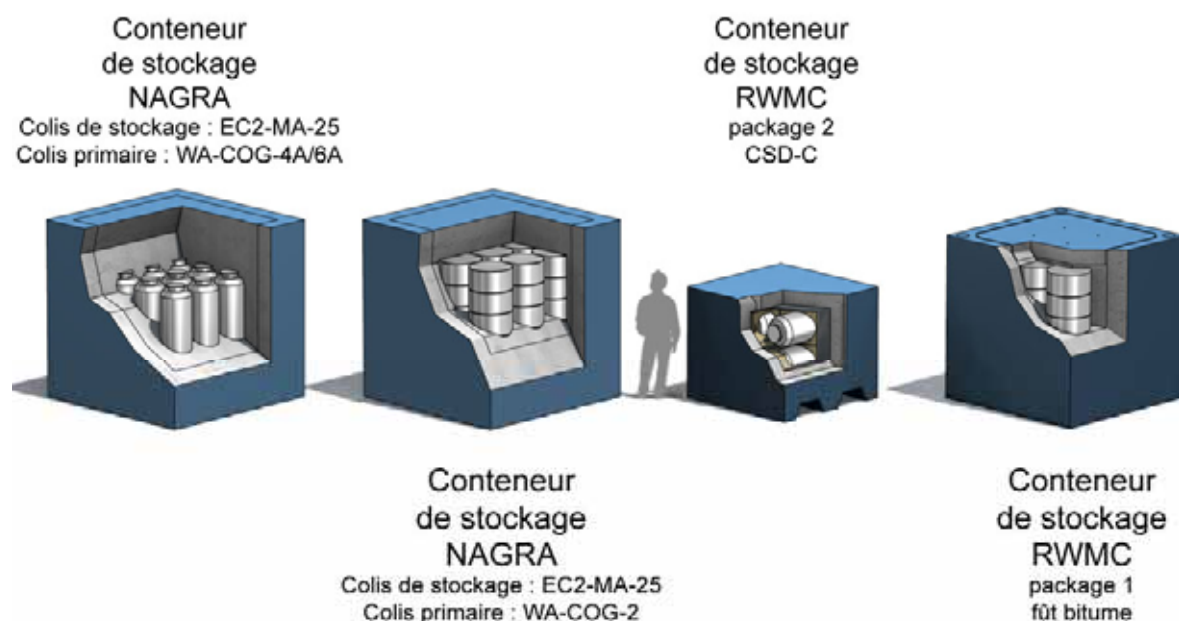
● Concept suisse (Nagra)

Le Projet « Opalinus Clay » [44] de l'agence suisse Nagra²⁵ est relatif à l'étude de faisabilité du stockage de déchets B (dits intermediate level waste ILW) dans un milieu argileux.

Nagra aussi envisage un complément de colisage des déchets dans un conteneur de stockage en béton. Les colis considérés sont des boîtes parallélépipédiques en béton empilables sur 2 à 3 niveaux. Leurs dimensions correspondent à un cube d'environ 2,40 mètres de côté. Ils contiennent neuf colis primaires de coques et embouts compactés (CSD-C) ou 18 fûts d'enrobés bituminés de 220 litres.

Les déchets primaires sont placés dans la boîte préfabriquée. Un remplissage en mortier est effectué pour combler les vides dans le conteneur de stockage et constituer un couvercle coulé au-dessus des déchets.

L'évacuation de l'hydrogène produit par radiolyse ou corrosion est assurée par un volume libre correspondant à une porosité du béton de 25 %.



C.IM.0SES.04.0511.B

Figure 4.1.4 Conteneurs de stockage étudiés par RWMC et Nagra

²⁵ Coopérative nationale pour l'entreposage des déchets radioactifs

4.1.3 Description et dimensionnement d'un conteneur standard

Cette section décrit plus en détail l'option de réalisation qui a été étudiée pour le conteneur standard. Le conteneur de stockage présenté ici satisfait à la fois les besoins d'un stockage, exprimés ci-avant, et ceux d'un entreposage de longue durée, voie de gestion des déchets étudiée par le CEA. Sa conception s'est ainsi effectuée en collaboration entre le CEA et l'Andra. Le dimensionnement mécanique et la compatibilité de l'objet avec les procédés de manutention sont présentés [41].

4.1.3.1 Description

Le corps et le couvercle du conteneur sont préfabriqués en béton armé et légèrement fibré²⁶. Le dosage de fibres (25 à 30 kg/m³) évite une fissuration hétérogène du béton lors du retrait à la prise ; le retrait ne pourra alors se traduire que par des microfissures, réparties de manière homogène, qui n'affaibliront pas l'objet.

Pour limiter les risques de corrosion et améliorer la durabilité mécanique du conteneur, l'utilisation d'acier inoxydable pour les armatures et les fibres a été retenue. On notera qu'en situation de stockage, la très faible humidité attendue dans les alvéoles pendant la période où régneront des conditions oxydantes, limiterait néanmoins le risque de corrosion d'armatures et de fibres en acier non ou faiblement allié – ou, pour les fibres, en fonte d'acier.

Le corps est en béton de haute performance (BHP) de résistance à la compression de 75MPa et le couvercle en BHP 60 MPa. Le couvercle est constitué d'une plaque posée sur le rebord intérieur des voiles latéraux du corps (Figure 4.1.5), avec 5 traversées (1 centrale et 4 périphériques) pour le passage de tirants fixés dans le corps (voir infra).

Pour permettre l'évacuation de l'hydrogène produit par la grande majorité des colis primaires, des événements peuvent être ajoutés en haut du corps du conteneur. Ces événements sont constitués d'un orifice cylindrique réservé lors de la préfabrication du corps du conteneur et sont localisés sur deux faces opposées du conteneur, afin de permettre à l'hydrogène de diffuser hors du colis de stockage.

De plus, un second mode d'évacuation de l'hydrogène est aussi pris en compte dans la conception du conteneur, pour en assurer la compatibilité avec les spécifications d'un entreposage de longue durée. Il s'agit d'un transfert au travers du béton du couvercle. Il en résulte le choix d'un béton spécifique pour le couvercle et une limitation de l'épaisseur de celui-ci à 150 mm à ce stade. Ces caractéristiques spécifiques du couvercle lui confèrent une perméabilité à l'hydrogène, évitant, dans les conditions d'un entreposage de longue durée²⁷, de recourir à des événements.

Pour la fermeture du conteneur, le couvercle est clavé mécaniquement au corps par un liant hydraulique coulé dans une rainure aménagée entre le corps et le couvercle. Le remplissage des traversées du couvercle par le liant permet de sceller les tirants au couvercle. Les tirants ainsi scellés contribuent à solidariser le corps et le couvercle et minimisent les risques d'arrachement du couvercle en situation de chute.

²⁶ Des variantes limitant les armatures, mais avec un renforcement des fibres ont aussi été étudiées. Une première variante est ainsi constituée d'un corps fibré à plus de 50 kg/m³ avec couvercle armé et légèrement fibré. Les dimensions enveloppes, la géométrie du corps, le couvercle armé, sont inchangés. Une seconde variante sans aucune armature impliquerait une épaisseur de béton du couvercle supérieure à 150 mm, non compatible selon les connaissances actuelles avec une évacuation de l'hydrogène par la porosité du béton (situation d'entreposage de longue durée).

²⁷ A ce stade des études, on considère que les événements sont obturés pendant l'entreposage et si nécessaire libérés en entrée du stockage

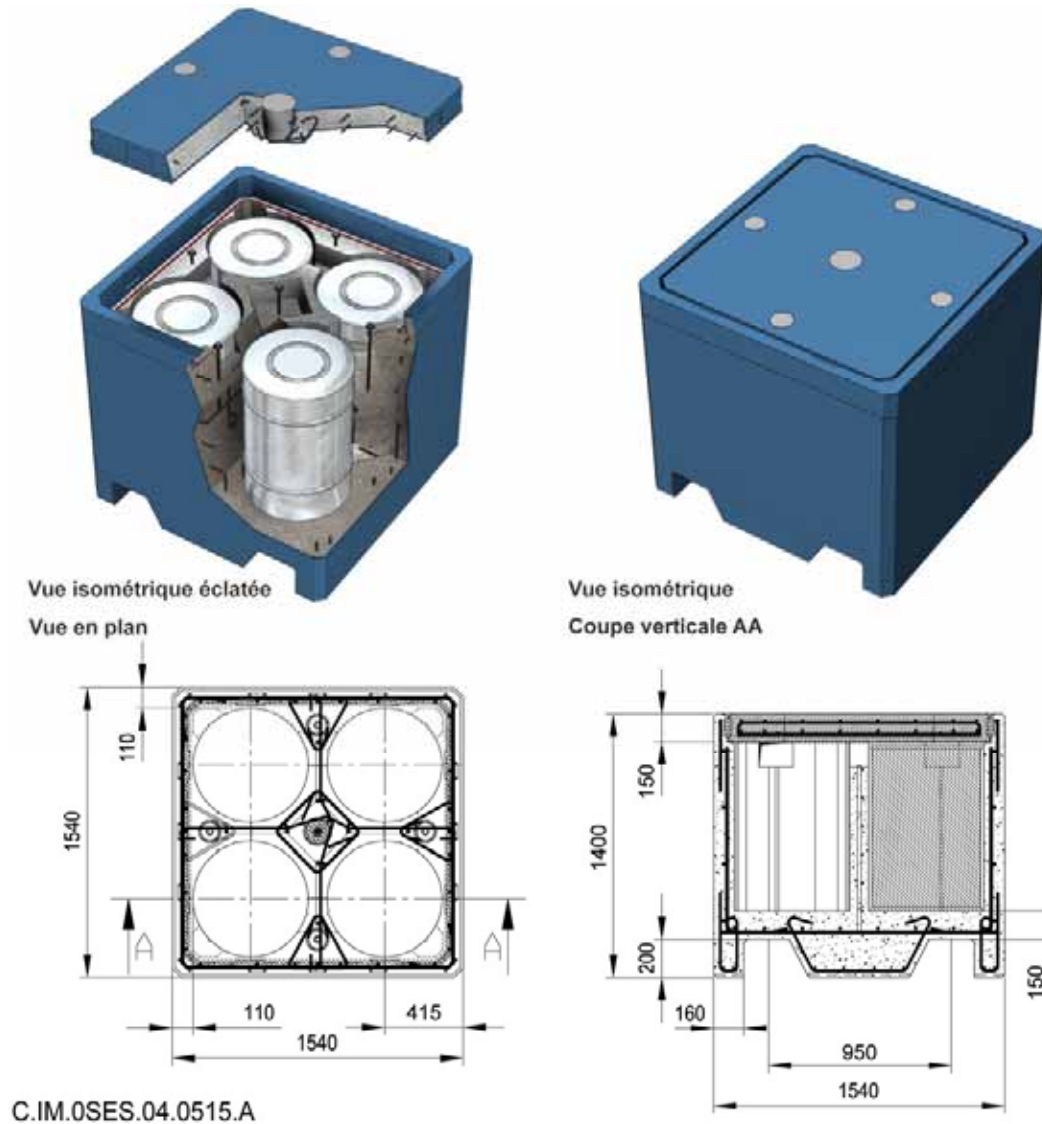


Figure 4.1.5 Colis de stockage standard (illustration pour colis types B2.1)

4.1.3.2 Dimensionnement mécanique

En conditions normales de stockage, la charge mécanique à laquelle les colis standard doivent résister correspond à leur empilement en alvéole. Un défaut d'alignement vertical de 20 mm entre deux colis successifs est aussi pris en compte. Ce cas de charge conduit à vérifier le bon dimensionnement des voiles en béton du colis, mais ne génère aucune exigence sur le couvercle.

Des calculs statiques de dimensionnement ont été réalisés en s'appuyant sur les règles de l'Eurocode 2 [45]. L'élément dimensionnant pour le corps est la zone en traction dans les parois verticales, compte tenu de la prise en compte du défaut d'empilement. L'épaisseur minimale des voiles de béton (110 mm) est définie pour permettre la mise en place des armatures et leur enrobage par le béton. Compte tenu du choix d'un béton armé de haute performance (BHP) de résistance à la compression de 75 MPa pour le corps, la capacité de résistance des voiles en épaisseur minimale est très supérieure aux efforts induits par les chargements [41].

Comme indiqué plus haut, il convient aussi d'évaluer le comportement du colis de stockage en situation de chute en alvéole. Cela conduit à vérifier que les déformations induites sur les colis primaires sont suffisamment faibles pour garantir le maintien du confinement des matières radioactives.

Pour ce faire, on a réalisé des simulations dynamiques de la chute par un calcul aux éléments finis avec évaluation des conséquences de l'impact (cf. § 11.8). De plus, un programme d'essais de chute de démonstrateurs de conteneurs est prévu en 2005 afin de confirmer les conclusions de ces simulations.

4.1.3.3 Interface de manutention

Le principe de manutention des colis dans les alvéoles de stockage est fondé sur l'utilisation d'un engin de type « chariot élévateur à fourches » (cf. § 9.3.2). Les fourches assurent la prise en charge du conteneur de stockage grâce à deux logements pratiqués dans l'épaisseur du colis. La dimension des sections des logements pour passage de fourches est standardisée à 200 millimètres par 200 millimètres environ.

Les distances d'entraxe des fourches peuvent être standardisées. De ce point de vue deux types de colis sont envisagés. Les colis les moins lourds (masse comprise entre 6 et 15 tonnes) contenant quatre colis primaires (cas des colis B2 et B5) ont un entraxe de fourches standardisé à 950 millimètres. Les colis plus lourds (masse comprise entre 15 et 25 tonnes environ) contenant un, deux ou quatre colis primaires ont un entraxe de fourches standardisé à 1 600 millimètres.

4.1.4 Variante à capacité de rétention renforcée

Comme indiqué au § 4.1.2.3 l'étude d'une variante vise à évaluer la possibilité de mobiliser à long terme la capacité de rétention du béton du colis de stockage.

Un mode de réalisation possible pour cette variante est décrit ci-après sur la base du colis type B5.2 (colis de coques et embouts et de déchets technologiques métalliques compactés) représentatif des colis de déchets B les plus actifs contenant des produits d'activation et de fission à vie longue (^{94}Nb , ^{93}Zr notamment).

4.1.4.1 Description

Cette variante se distingue de la précédente par l'utilisation d'une seule formulation de béton pour l'ensemble des composants du colis, l'absence d'armatures, le renforcement en fibres et un mode de fermeture spécifique. L'absence d'armature favorise la durabilité recherchée pour ce conteneur, mais implique un plus fort dosage en fibres pour assurer la résistance mécanique.

Le mode de réalisation envisagé pour cette variante comprend, comme le colis standard, un corps préfabriqué avec des logements ajustés aux dimensions des colis primaires. La fermeture est réalisée par quatre couvercles indépendants coulés dans la partie supérieure de chacun des quatre logements du corps. Préalablement au coulage du couvercle, un bouchon préfabriqué de forme conique (dont la fonction est d'obturer le jeu fonctionnel) est mis en place au-dessus du colis primaire dans chaque logement. L'utilisation de bouchons préfabriqués permet de faciliter une opération de retrait éventuel des colis primaires et assure une bonne liaison mécanique au-dessus des vides résiduels du logement.

Le corps préfabriqué et les quatre couvercles coulés sont constitués d'un même et unique béton BHP fibré inox (90 MPa minimum, voir infra). Le choix de l'inox est conservé pour limiter les risques de corrosion.

Cette variante est illustrée ci-dessous (Figure 4.1.6). Ses dimensions sont d'environ 1,50 mètre en largeur et en longueur et de 2 mètres en hauteur (colis type B5.2.). Sa masse totale (conteneur plein) est d'environ 12 t.

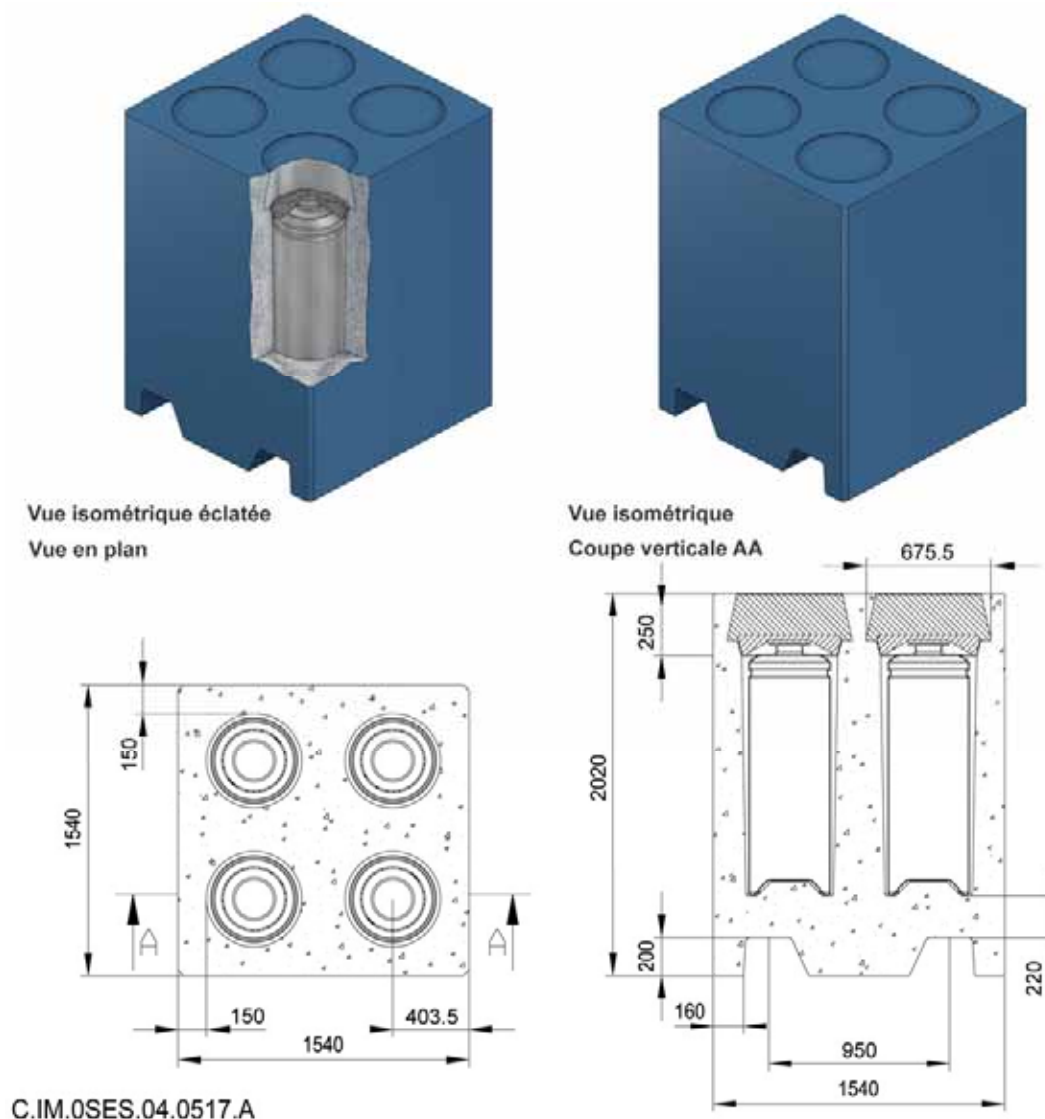


Figure 4.1.6 Variante de conteneur à capacité de rétention renforcée (illustration pour colis type B5.2)

Une technique alternative de fabrication du conteneur, dite « monolithe intégral », est envisageable. Elle serait constituée d'un continuum de béton de haute performance coulé en une seule fois autour des colis primaires. L'unicité de la coulée permettrait ainsi d'éviter les discontinuités liées aux reprises de bétonnage entre le corps du conteneur et les couvercles de fermeture.

Le principe de fabrication d'un tel objet réside dans l'utilisation d'un béton dont la prise est accélérée grâce à l'utilisation d'un adjuvant adapté, et dont la résistance mécanique devient suffisante pour assurer pendant la fabrication le support des colis primaires. Les questions spécifiques à cette option de fabrication sont relatives notamment à la formulation du béton, au principe de maintien des colis et à leur bon positionnement pendant la coulée ainsi qu'à la maîtrise du retrait dit « empêché » pour éviter la formation de fissures.

Comme indiqué plus haut, l'agence Japonaise RWMC a étudié une solution de ce type et a réalisé avec succès un démonstrateur à l'échelle $\frac{1}{4}$ avec un panier métal parallélépipédique. Le béton utilisé est du type BFUP Ductal®.

4.1.4.2 Capacité de rétention renforcée

Pour mobiliser de façon durable une capacité de rétention du béton, il est nécessaire de définir un béton présentant de très bonnes propriétés intrinsèques en termes de compacité, mais aussi de maîtriser l'état de fissuration associé aux conditions de préfabrication et de fermeture du colis.

En termes de matériau, la formulation du béton envisagée vise des performances élevées (une perméabilité inférieure à $2 \cdot 10^{-13}$ m/s, un coefficient de diffusion inférieur à $2 \cdot 10^{-13}$ m²/s et une porosité de 10 % au plus). Une épaisseur de 150 mm est retenue.

Une attention particulière doit être apportée sur la jonction au niveau de chaque logement entre le corps du conteneur et le béton coulé en deuxième phase. Des dispositions de conception ont été étudiées pour assurer une bonne liaison corps/couvercle : limitation du diamètre des couvercles coulés, réduisant un retrait éventuel générateur de microfissuration, forme circulaire évitant les zones singulières, choix du profil de l'interface s'appuyant sur le retour d'expérience de colis existants (colis de déchets de faible et moyenne activité stockés au Centre de l'Aube). Un programme d'essais sur cette jonction est en cours en 2005 pour vérifier qu'elle ne constitue pas une zone de faiblesse.

4.1.4.3 Dimensionnement mécanique

Par rapport au colis standard, l'abandon de toute armature réduit la capacité de résistance à la traction, qui devient la caractéristique la plus contraignante pour le dimensionnement. Il convient donc d'une part de limiter les sollicitations en traction susceptibles de créer des fissures ou de les propager, et d'autre part de renforcer les caractéristiques intrinsèques du béton fibré en augmentant le dosage en fibres (entre 55 kg/m³ et 90 kg/m³ suivant le type de fibres choisi) et la compacité du béton. Une tenue minimale de 5 MPa en traction/flexion est ainsi visée.

Le principe des logements avec couvercle individuel coulé offre une structure adéquate qui limite les sollicitations en traction dans le béton (limitation de l'amplitude et de l'étendue de la zone soumise aux efforts de traction au-dessus du logement de colis).

Le dimensionnement mécanique est fondé sur un cas de charge de pression qui s'appliquerait uniformément sur le conteneur. La mise en charge des conteneurs de stockage sera de fait progressive sur le long terme, en fonction de l'évolution du revêtement de l'alvéole et du fluage de l'argilite. Une valeur de pression isotrope de 12 MPa est retenue pour le dimensionnement du colis. Cette valeur est considérée comme enveloppe du chargement uniforme qui pourra s'appliquer à long terme²⁸.

Le calcul de dimensionnement a été réalisé en s'appuyant sur les règles de l'Eurocode 2 [45], notamment concernant le choix des facteurs de sécurité pénalisants permettant de prendre en compte les défauts géométriques et les tolérances d'exécution des conteneurs auxquels s'ajoute un coefficient de sécurité supplémentaire (coefficient de vieillissement) qui prend en compte la dégradation du béton sur le long terme [41].

L'application de ces conditions très sévères pour les contraintes de compression et de traction conduit à privilégier un béton de haute performance (BHP) de résistance à la compression portée à 90 MPa, afin de vérifier le respect du critère avec marge en traction et compression en tout point. La valeur élevée de la contrainte de dimensionnement retenue (12 MPa) conduit à augmenter l'épaisseur des cloisons internes (220 mm) et des parois externes (150 mm déjà spécifié pour retarder les radionucléides) par rapport au colis de stockage standard (cloisons internes et parois latérales de l'ordre de 110 mm) de façon à renforcer la résistance mécanique de la structure. Cet élément conforte le choix de couvercles individuels qui permet de réduire la portée du couvercle au-dessus des logements.

²⁸ Pour ce cas de charge, les sollicitations engendrées au moment de la mise en place des colis par le défaut d'alignement de 20 mm évoqué au paragraphe précédent apparaissent négligeables par rapport aux 12 MPa qui s'exercent à long terme.

4.1.5 Le béton constitutif des conteneurs de stockage

Les exigences sur les matériaux déduites des normes en vigueur dans le domaine des ouvrages de génie civil en béton [46] correspondent en général à des considérations mécaniques et à une durabilité séculaire des ouvrages.

Dans le cadre de l'étude des conteneurs, l'Andra et le CEA ont adopté ces normes ; ils les ont de plus complétées par des exigences renforcées. Les réponses apportées ici sont ainsi fondées sur des études scientifiques, des essais en laboratoire et des tests de convenance industriels réalisés sur plusieurs années. Certaines d'entre elles sont en synergie avec les homologues étrangers de l'Andra, notamment l'agence japonaise RWMC.

Le béton des colis de stockage est constitué de quatre groupes de matériaux :

- le ciment, les ajouts minéraux et l'eau ;
- les adjuvants ;
- les granulats (sables et graviers) ;
- les armatures et ou fibres métalliques.

La présente section est consacrée à la définition des caractéristiques de chacun d'eux. Il présente la contribution respective à la performance globale du colis.

4.1.5.1 Traduction technique des performances attendues

On notera d'abord qu'il existe une cohérence forte entre la durabilité d'un béton et sa capacité de confinement. En effet, un béton pour répondre à de tels objectifs sera très compact (faible porosité), et doté d'un très faible coefficient de diffusion et d'une perméabilité réduite (pas de porosité ouverte, ni de fissuration). Ces qualités sont favorables à la durabilité du béton, car elles préviennent la pénétration du béton par l'eau et empêchent donc les réactions chimiques d'altération engendrées par la présence d'eau. Elles sont également favorables vis-à-vis du potentiel de confinement.

La capacité à mettre en œuvre le matériau et obtenir un état initial de la meilleure qualité possible (c'est-à-dire avec une fissuration aussi limitée que possible en ouverture et en longueur) est conditionnée par :

- une faible chaleur d'hydratation ;
- un retrait endogène limité ;
- une relaxation suffisante des contraintes générées au jeune âge par les déformations empêchées dans la structure.

Outre les caractéristiques précédentes, la durabilité du béton est également subordonnée à la prévention des pathologies du béton comme les réactions alcali silice et alcali granulats, l'attaque sulfatique, l'hydrolyse et la carbonatation [47].

Les conséquences d'une réaction entre certains granulats siliceux ou silico-calcaires et la solution interstitielle alcaline du béton sont une hydrolyse de la silice et la formation d'un gel de silice. Cela conduit à la création d'un gel, plus ou moins cristallisé, au volume plus important que les réactifs initiaux. Le béton peut se fissurer sous l'effet de cette expansion. De même, les conséquences d'une attaque sulfatique se mesurent en termes de dégradations mécaniques du béton. En effet, la précipitation de composés expansifs (principalement des sulfato-aluminates de calcium) entraîne localement des contraintes mécaniques qui dépassent les capacités des matériaux et crée ainsi des zones fortement fissurées. Le choix de granulats non réactifs et de ciments avec une teneur limitée en aluminates tricalciques (C_3A) permet la maîtrise de ces pathologies.

La principale conséquence de l'hydrolyse des matériaux cimentaires est la perte de la capacité tampon acido-basique au travers de la dissolution des principaux hydrates du béton. Cela entraîne une perte importante des propriétés mécaniques. Un moyen de limiter la propagation de ce front de dégradation du béton est de retenir des matériaux peu perméables. La carbonatation du béton, négligeable tant que l'environnement n'est pas resaturé, a dans un premier temps comme conséquence de limiter les

propriétés de transfert du béton (baisse de la porosité) et donc de limiter la propagation du front de dégradation par hydrolyse par exemple. Mais, à terme, cette couche « passivante » est détruite par les autres phénomènes de dégradation du béton et en particulier l'action solubilisante de l'eau²⁹. Ici encore en choisissant des bétons de faible perméabilité, on limite l'extension de la zone perturbée par la carbonatation du béton de colis.

Le choix des matériaux constitutifs du béton résulte des éléments mentionnés ci-dessus. On notera que ce choix ne s'applique pas à la formulation du couvercle du conteneur standard définie spécifiquement pour favoriser une diffusion de l'hydrogène.

4.1.5.2 Le ciment, les ajouts minéraux et l'eau

● Ciment et ajouts minéraux

Le ciment recommandé est de type « mélangé ». Il est caractérisé par une composition ternaire (exemple : CEM V, ou CEM I avec ajouts de fumées de silice et cendres volantes). Ce choix permet de réduire la chaleur d'hydratation et d'obtenir des bétons avec une microstructure plus développée. Cela conduit à des bétons plus compacts, moins poreux et moins perméables.

La teneur du clinker en aluminat tricalcique (C_3A) est limitée à moins de 5 %. Ce choix³⁰ permet de minimiser les désordres physiques (risques de fissuration) dus à l'exothermicité de la réaction d'hydratation des aluminates tricalciques (C_3A).

La quantité d'alcalins (K et Na) présents dans le ciment, adjuvants et autres constituants, est la plus faible possible, afin de limiter le risque de réaction alcali silice (taux en alcalins Na_2O équivalent inférieur ou égal à 0,6 %).

La classe de résistance du ciment pour permettre d'obtenir un béton de classe BHP doit être a minima de 42,5 MPa.

● Dosage en eau et rapport eau totale sur liant total

Le rapport pondéral eau totale (E) sur liant total (L = ciments et ajouts minéraux) doit être strictement inférieur à 0,40. Pour ce faire, au-delà d'un dosage raisonnablement maximisé en liant, il convient de minimiser le dosage en eau (E). Un dosage raisonnable en liant, en conformité avec la prise en compte d'un milieu agressif et de la normalisation actuelle se situe dans la fourchette 300 à 550 kg/m^3 .

Ce choix contribue de façon significative à l'obtention d'une bonne compacité du béton, c'est-à-dire à une minimisation de la porosité. Il s'ensuit une meilleure protection vis-à-vis des attaques chimiques et une amélioration des performances mécaniques et de confinement.

Par ailleurs, le faible dosage en eau participe à la limitation du terme source hydrogène par radiolyse de l'enveloppe, notamment pour les conteneurs de stockage qui contiennent des colis primaires irradiants types B1 et B5 en particulier.

4.1.5.3 Les adjuvants

Pour la mise en œuvre, l'emploi d'adjuvants est nécessaire. Ils compensent le faible dosage en eau en apportant au béton la fluidité requise au moment de sa mise en place. Toutefois, les adjuvants étant pour la plupart des matériaux organiques, leur dosage doit néanmoins être ajusté afin de limiter la quantité de complexants susceptibles d'influer sur les mécanismes de transfert par l'eau (solubilité) des radionucléides.

²⁹ Toutefois ce phénomène de carbonatation se produira essentiellement à l'interface entre le béton des alvéoles de déchets B et le milieu géologique et ne concerne pas directement les colis.

³⁰ Les ciments retenus pour répondre à cet objectif sont de type PMES (PMES: Prise Mer Eau Sulfatée) ce qui permet aussi de se prémunir de l'attaque sulfatique.

4.1.5.4 Les granulats

Le choix des granulats (sables et graviers) prévient les phénomènes d'altération par réaction alcali silice.

Compte tenu des échelles de temps visées, en particulier pour la variante à capacité de rétention renforcée, le granulats doit être un calcaire physico-chimiquement stable. Les calcaires dolomitiques (contenant du Magnésium), ou les calcaires avec beaucoup d'alcalins doivent être évités. Les granulats calcaires envisagés doivent contenir au moins 95 % de carbonate de calcium (CaCO_3). Les impuretés constituant les 5 % restants doivent également être exemptes de toute réaction alcali-silice.

Le diamètre des granulats doit être limité (classe dimensionnelle inférieure à 12,5 millimètres) afin d'améliorer la résistance mécanique du béton et sa compacité. Le fuseau granulaire peut aussi être affiné pour améliorer la compacité du béton en vue de performances accrues et faciliter le coulage du béton (injection, possibilité de pompage).

4.1.5.5 Fibres et armatures éventuelles

Les fibres et les armatures éventuelles répondent aux besoins de renforcement mécanique et de durabilité du conteneur.

L'adoption d'armatures et/ou fibres en acier inoxydable évite les risques de fissuration associés à l'expansion des produits de corrosion des aciers non alliés. Il convient de noter que le niveau de concentration en chlorures de l'eau susceptible d'atteindre le colis en situation de stockage a peu d'influence en milieu anoxique sur la corrosion des aciers inoxydables.

L'ajout de fibres dans le béton permet d'en améliorer la qualité en réduisant les risques de microfissuration et d'apporter des caractéristiques de ductilité et de résistance à la traction. Une résistance à la traction de 5 MPa a ainsi été visée.

Cependant, le rôle des fibres ne permet d'éviter le début de fissuration sous traction que si les propriétés physiques de la matrice béton sont telles que le matériau possède des propriétés de ductilité élevées. Dans le cas contraire, les fibres ne reprennent l'effort qu'après amorçage de fissuration.

4.1.5.6 Formulation, tests de mise en œuvre industrielle et performances obtenues

Plusieurs formulations de béton ont été développées en laboratoire, puis testées par des essais de convenance industrielle. Lors de ces essais, une attention particulière a été apportée à la « pompabilité » du béton en lien avec la dimension des granulats, la dimension et la forme des fibres. Ainsi, il a été recherché un béton de type auto-plaçant ne nécessitant pas de vibration pour sa mise en place.

Deux types de formulations ont été développés :

- une première base de formulation est définie à partir de CEM I avec ajout d'une part de 10 % de fumées de silice et d'autre part de filler calcaire ou de cendres volantes, pour une masse totale de liant proche de 500 kg/m^3 , et avec une masse d'eau entre 170 et 200 kg/m^3 . Le rapport E/L obtenu est inférieur à 0,35. Les granulats et sables sont des calcaires du Boulonnais pour une masse totale d'environ 1700 kg/m^3 . Les fibres sont des fibres à crochets inoxydables pour 30 kg/m^3 (ou 56 kg/m^3 pour la variante sans armature) ;
- une seconde base de formulation est définie à partir de CEM V avec ajout complémentaire de 5 % de fumées de silice pour une masse totale de liant de 500 kg/m^3 environ et une masse d'eau d'environ 170 kg/m^3 . Le rapport E/L obtenu est inférieur à 0,35. Les fibres sont des fibres inoxydables droites pour 85 kg/m^3 .

Par ailleurs, la formulation spécifique du couvercle du colis standard (perméable à l'hydrogène) a été développée sur base de CEM I avec filler calcaire sans fumée de silice et seulement 25 kg de fibres inox à crochet.

Les formulations développées et mises en œuvre pour la fabrication des démonstrateurs permettent d'atteindre les objectifs fixés.

4.1.5.7 Évolution du pH en situation de stockage

Le choix des matériaux et la mise au point des formulations présentées ci-dessus permettent de viser un pH de béton frais de 13 qui va rapidement tendre vers un pH de l'ordre de 12,5 après la maturation du béton. Ensuite en fonction de l'évolution du béton et de sa dégradation chimique, notamment par hydrolyse, le pH diminue très lentement pour tendre à l'état dégradé vers un pH de l'ordre de 10,5 [48].

4.1.6 Techniques de fabrication

Cette section présente des techniques de fabrication, en usine et dans les installations de surface du stockage, retenues pour le colis de stockage standard d'une part et pour la variante explorant une capacité de rétention accrue [41].

Le travail conjoint Andra CEA a permis d'aboutir à la réalisation de démonstrateurs de conteneurs à l'échelle 1 en 2004 et 2005. Pour le conteneur standard, deux variantes ont été réalisées (corps fibré et armé, et corps fibré non armé) sur la base des colis primaires B2.1 ; pour le cas d'une capacité de rétention accrue, le conteneur avec corps préfabriqué et couvercle coulé pour des colis primaires B5.2 a été fabriqué. C'est sur la base de ces démonstrateurs que les processus de fabrication sont ici présentés.

Associés à la réalisation des objets, des programmes sont en cours pour confirmer l'évolution au jeune âge des différents béton mis en œuvre, les performances des liaisons conteneurs - couvercles (clavage et couvercle coulé) ainsi que les conséquences d'une chute d'un colis.

4.1.6.1 Fabrication des colis de stockage préfabriqués standards

● Principes généraux de fabrication

Le principe de fabrication du colis de stockage standard consiste à maximiser le nombre d'étapes mises en œuvre en contexte non irradiant afin de pouvoir contrôler la qualité de fabrication de la façon la plus simple possible et optimiser les coûts de fabrication.

Deux types d'éléments sont préfabriqués en usine, en contexte non irradiant : les corps et les couvercles.

Les autres opérations de fabrication sont réalisées en cellules irradiantes :

- le chargement des colis primaires ;
- la fermeture du colis de stockage (par joint de clavage ou par liant hydraulique) ;
- le mûrissement du joint de fermeture corps/couvercle en entreposage tampon (durée 28 jours) ;
- le contrôle du colis avant mise en alvéole de stockage.

● Processus de préfabrication des couvercles et des corps

Les couvercles et les corps sont préfabriqués dans une unité spécialisée comprenant une centrale à béton, et un atelier de fabrication permettant d'assurer la maîtrise du procédé, son contrôle et sa répétabilité.

Les opérations de fabrication consistent en un moulage du corps et du couvercle, puis après environ 24 heures de pré-stockage dans les moules, en un démoulage et une cure, après application d'un produit de cure du béton. La Figure 4.1.7 présente les moules en acier réalisés pour les démonstrateurs de conteneur standard.



Figure 4.1.7 *Moule du corps pour conteneur standard (B2)*

Les procédés de réalisation de conteneurs préfabriqués moulés en béton-fibres existent déjà dans l'industrie nucléaire où ils sont mis en œuvre depuis plus de 15 ans, et ont permis à ce jour la livraison de plus de 45 000 conteneurs de stockage de déchets aux opérateurs nucléaires COGEMA et CEA. Par ailleurs, la technologie des conteneurs moulés en béton armé est également mise en œuvre depuis plus de 15 ans par EDF pour la reprise des déchets d'exploitation des centrales électronucléaires françaises, avec des flux de l'ordre de 1 200 à 1 500 colis par an.

Le mode de moulage des conteneurs pour les colis type B, exposé ci-dessus, est déjà utilisé par SOGEFIBRE pour la réalisation, en particulier, des conteneurs cubiques type CBF-K

Le processus de fabrication n'est pas différent que le corps du conteneur soit simplement fibré ou fibré et armé. La seule différence consiste dans le positionnement préalable des armatures dans le moule.

Les Figure 4.1.8 et Figure 4.1.9 présentent les premières opérations réalisées en usine pour fabriquer les démonstrateurs en environnement non irradiant ainsi que les premiers conteneurs standard réalisés.



Figure 4.1.8 *Mise en place des noyaux dans le moule du colis standard B2 avant coulage*



Figure 4.1.9 Démonstrateur de conteneur standard

- **Mise en place des colis primaires en cellule irradiante**

La manutention des colis primaires s'effectue de façon analogue à ce qui est mis en œuvre par les exploitants des installations nucléaires desquels sont issus ces colis primaires (cf. § 9.1.3).

- **Fermeture du colis de stockage standard**

La fermeture est un aspect important du processus de fabrication du conteneur standard. Le procédé retenu consiste à fermer le colis par « clavage hydraulique » du couvercle sur le corps. Le clavage a comme fonction d'assurer une liaison mécanique et d'étanchéité entre le couvercle et le corps et d'empêcher l'arrachement du couvercle. Il est réalisé grâce à une rainure de quelques centimètres entre le corps et le couvercle dont le profil est adapté pour s'opposer à l'arrachement du couvercle. Un béton frais est coulé dans cette rainure.

Au stade actuel, la solution retenue du couvercle clavé, avec joint de clavage, présente l'intérêt d'un retour d'expérience important. Le clavage est un procédé très largement utilisé sur les colis de béton fibré actuellement stockés au Centre de l'Aube (CBF-C1C, CBFK, ...). Cette technique classique a été mise en œuvre dès 1990 sur les conteneurs de béton fibré de Cogema. À ce jour, la fabrication de 8 000 colis type CBF-K a été réalisée sur La Hague et Marcoule (flux de 400 colis par an). Environ 200 colis CBF-C2K ont été réalisés sur les sites du CEA (principalement à Grenoble).

4.1.6.2 Fabrication de colis de stockage à capacité de rétention renforcée

Comme dans le cas précédent, le conteneur est constitué en deux temps. Dans une première étape, le corps est fabriqué hors contexte nucléaire. Dans une deuxième étape, le chargement des colis primaires et la fermeture du colis sont réalisées en cellule irradiante.

A l'issue de la mise en place des colis primaires dans le corps, une tôle d'obturation est déposée dans chaque logement individuel. Chacun d'eux est ensuite fermé par coulée de béton. Le mûrissement de ces petits couvercles de fermeture est réalisé en entreposage tampon (durée 28 jours) pour obtenir des performances suffisantes et une stabilisation du béton permettant de contrôler la qualité du conteneur avant son transfert en stockage.

Le procédé du coulage de couvercles sur corps préfabriqué bénéficie d'un retour d'expérience industriel important ; il est mis en œuvre depuis 1990 par COGEMA et EDF pour les colis de faible et moyenne activité stockés au Centre de l'Aube.

Cette technique a permis à COGEMA de réaliser plus de 35 000 colis en 15 ans (CBF-C1 et CBF-C2). Elle nécessite un atelier spécialisé (AD2 à La Hague) pour le remplissage et la fermeture des conteneurs. Une technique similaire est utilisée par EDF pour la fabrication des colis destinés au centre de stockage de surface [C1PG ou C4PG (formulation de type F44, béton armé)].

La Figure 4.1.10 et la Figure 4.1.11 présentent la mise en place des noyaux dans le moule en usine pour fabriquer les démonstrateurs en environnement non irradiant, et les premiers conteneurs réalisés.



Figure 4.1.10 Mise en place des noyaux dans le moule du colis standard B5 avant coulage



Figure 4.1.11 Démonstrateur de conteneur à capacité de rétention renforcée

4.2 Les colis de stockage de déchets C

Lors du retraitement des combustibles usés, les actinides mineurs et produits de fission sont séparés et incorporés dans du verre. Le verre contribue à long terme à la sûreté du stockage. Placé dans des conditions favorables, il limite très fortement le relâchement des radionucléides qu'il contient avec une durée de vie de l'ordre de la centaine de milliers d'années au moins.

Cependant, lors des premières centaines d'années, la décroissance des produits de fission et des actinides à période moyenne engendre un échauffement local significatif. La maîtrise des phénomènes pendant cette période dite « phase thermique » conduit à poser la question du stockage des colis primaires en l'état ou de l'intérêt d'une mise en surconteneur préalablement au stockage. En l'état actuel des connaissances, l'Andra a privilégié la seconde option.

Le présent chapitre expose les considérations scientifiques ayant conduit à ce choix, les différentes réponses techniques envisagées et l'option privilégiée à ce stade des études.

Il présente également, dans un souci d'évaluation de faisabilité, le dimensionnement du surconteneur et les techniques de fabrication fondées sur des pratiques industrielles éprouvées.

4.2.1 Exposé des questions principales

4.2.1.1 Besoin d'un surconteneur

Pour comprendre la justification de l'étude d'un surconteneur, il convient tout d'abord de rappeler que le colis primaire est constitué d'une matrice de verre à l'intérieur d'une enveloppe en acier inoxydable. Le besoin d'un surconteneur découle des spécificités phénoménologiques de la phase dite « thermique » pendant laquelle la température du colis passe par un maximum ou « pic thermique »³¹, puis décroît progressivement. Les phénomènes qui caractérisent cette phase augmentent l'altérabilité de la matrice de verre, influent sur le comportement des radionucléides qu'il contient et fragilisent l'enveloppe inox du colis primaires vis-à-vis de la corrosion [37].

Vis-à-vis de l'altérabilité de la matrice, les modèles de dissolution du verre retiennent (i) un contrôle de la cinétique du processus d'altération par la dissolution de la silice, principal constituant du verre (ii) un relâchement des radionucléides suivant une dissolution congruente³² avec celle de la silice. Pour les colis types C1 à C4, le modèle privilégié pour sa robustesse en l'état actuel des connaissances, consiste en deux phases. Au cours de la première phase la vitesse initiale de dissolution [V_0] résulte d'un déséquilibre géochimique entre le verre et son environnement. Au cours de la deuxième phase, la saturation en silice de l'environnement du déchet se traduit par un ralentissement de la dissolution vers une vitesse résiduelle [V_R]. Pour les colis types C0, le régime de dissolution selon la vitesse initiale est considéré perdurer. Ces deux vitesses, V_0 et V_R , dépendent de la température : entre 50 °C et 90 °C, la vitesse de dissolution initiale augmente d'un facteur 30, la vitesse résiduelle d'un facteur 15 environ³³[40].

En ce qui concerne le comportement des radionucléides susceptibles d'avoir été relâchés, il convient de poser la question de la maîtrise des phénomènes thermodynamiques régissant les équilibres chimiques. En effet, les phénomènes physico-chimiques mis en jeu sont sensibles à la température. La solubilité des éléments peut être augmentée ou diminuée lorsque la température augmente. Les données physiques qui déterminent la spéciation³⁴ d'un élément en solution sont connues dans un domaine de température limité à ce jour, théoriquement à 50-60 °C. En pratique, on considère que les incertitudes sur l'extrapolation de la spéciation évaluée à partir de constantes d'équilibre acquises à 25 °C, sont maîtrisées jusqu'à 80 °C. La température influence aussi les mécanismes de sorption aux interfaces sur les phases solides, ainsi que le transport des espèces chimiques dans l'eau par diffusion (en particulier par effet « Soret ») ; la vitesse de diffusion augmente avec la température.

Enfin, les phénomènes décrits ci-dessus étant liés à la présence d'eau au contact du déchet il convient de s'interroger sur le moment où de l'eau pourrait effectivement atteindre le verre et dissoudre des

³¹ Pour mémoire, à la surface du colis, ce pic est de 100°C au plus.

³² La congruence signifie que l'on considère une même vitesse de dissolution pour toutes les espèces présentes dans le verre

³³ On notera aussi que la description du passage de V_0 à V_R peut présenter des incertitudes croissantes avec la température, du fait de l'extrapolation des données thermodynamiques disponibles régissant le comportement des espèces chimiques en solution et à l'interface entre les phases liquide et solide (mécanismes de sorption).

³⁴ La spéciation d'un radionucléide en solution est évaluée sur la base de constantes d'action de masse, enthalpiques et de capacité calorifique. Les deux derniers paramètres sont particulièrement difficiles à mesurer directement en température ; cela conduit à considérer, dans les modèles de spéciation, l'enthalpie réactionnelle constante avec la température, et à retenir une capacité calorifique nulle ; corollairement, cette approximation limite le domaine de validité des modèles.

radionucléides. La présence d'eau condensée dans les alvéoles, en provenance des argilites, ne peut être exclue à terme [8]. Au contact du conteneur primaire, cette eau serait alors susceptible de subir une radiolyse due à la radioactivité élevée des déchets, entraînant un haut potentiel oxydant. Dans ces conditions, il ne peut être exclu un risque d'un percement, par corrosion, du conteneur primaire, à l'échelle de quelques dizaines d'années. L'arrivée précoce d'eau sur le verre pourrait alors se traduire par un début de dissémination de radionucléides.

En conclusion, la sensibilité de l'altérabilité du verre à la température, l'incertitude relative au comportement des radionucléides au-delà de 80 °C et les risques de percement par corrosion de l'enveloppe inox ont donc conduit l'Andra à privilégier l'option d'un surconteneur pour interdire l'arrivée d'eau sur le verre a minima pendant la phase thermique, c'est-à-dire la phase pendant laquelle la température au coeur du verre est supérieure à 50 °C environ.

4.2.1.2 Autres besoins relatifs aux surconteneurs liés aux fonctions de sûreté

Lorsque le surconteneur aura perdu son étanchéité, il convient également de s'assurer que l'environnement du colis contribue à limiter la dissolution du verre et le relâchement de radionucléides.

Concrètement il faut donc vérifier que les interactions chimiques entre les matériaux constitutifs du surconteneur, les constituants du verre³⁵ et les matériaux argileux voisins peuvent être maîtrisées.

Par ailleurs, on notera le besoin de vérifier l'absence de risque de criticité, associé aux traces de matières fissiles laissées dans les colis C par le retraitement des combustibles usés.

4.2.1.3 Besoins opérationnels relatifs au surconteneur

La gestion de l'exothermicité des déchets C, dans un souci de bonne utilisation de l'emprise souterraine, a conduit l'Andra à privilégier une architecture de stockage en tunnels horizontaux comme indiqué au chapitre 2. Le surconteneur doit être conçu pour être compatible avec les opérations de mise en stockage en tunnel horizontal. Dans le cadre de la gestion réversible du stockage, il convient d'autre part de s'assurer de son aptitude à être retiré pendant une durée a minima séculaire.

4.2.2 Principes de conception retenus

4.2.2.1 Options envisagées

Plusieurs paramètres clés président à la conception du surconteneur : la nature des matériaux, le mode d'assemblage des composants du surconteneur et le nombre de colis primaires par surconteneur.

Vis-à-vis du choix des matériaux, une enveloppe métallique permet de garantir le maintien de l'étanchéité à l'eau pendant une phase thermique de longue durée (échelle du millier d'années).

Plusieurs familles de matériaux métalliques ont été envisagées. Un métal « noble » tel le titane ou un alliage passivable (à base de nickel, chrome, manganèse) pourrait être utilisé en faible épaisseur (20 à 30 mm). Le cuivre, pour lequel on dispose de données de comportement à la corrosion dans des conditions d'eau profonde [49], peut aussi être considéré. Le cuivre ne pourrait toutefois s'envisager qu'en association avec un autre matériau métallique du type acier ou fonte assurant la tenue mécanique du colis de stockage, comme dans les cas de conteneur étudié en Suède par SKB [49] pour des combustibles usés. Enfin, un acier non ou peu allié en forte épaisseur (de l'ordre de 50 à 60 mm) constitue une autre solution. L'acier non allié est un métal robuste d'usage courant dont les processus de corrosion généralisée sont bien maîtrisés.

Vis-à-vis du mode d'assemblage le besoin d'étanchéité nécessite une soudure en pleine pénétration. De ce point de vue, divers procédés de soudage ont pu être envisagés. Ils se répartissent en deux familles : le soudage avec métal d'apport (procédés TIG « Electrode de Tungstène avec Gaz Inerte »,

³⁵ Cela concerne en particulier la sorption de silice par les produits d'altération du surconteneur, et ses effets sur le passage de la vitesse initiale à la vitesse résiduelle de dissolution du verre (Cf. § 4.2.1.1)

MIG, MAG « Electrode de Métal avec Gaz Inerte ou Actif », Laser /YAG) et le soudage sans métal d'apport (Faisceau d'Électrons et Friction). On notera qu'en l'état actuel des connaissances, une étanchéité par joints rapportés n'apparaît pas compatible avec un objectif de grande durabilité.

Vis-à-vis du nombre de colis primaires par surconteneur il peut être envisagé un à deux colis primaires, au regard des considérations de masse et de manutention dans le puits d'accès et les galeries souterraines.

4.2.2.2 Comparaison des options envisagées et justification du choix

● **Choix du matériau constitutif du surconteneur**

Les métaux « nobles » tels le cuivre sont thermodynamiquement stables dans les conditions chimiques réductrices du stockage. Les alliages à base de chrome, nickel, molybdène, ainsi que les alliages de titane, sont capables de se passiver, grâce à la formation en surface d'une fine couche corrodée protégeant le reste du métal. Pour une durabilité millénaire, l'Andra a, parmi ces matériaux, approfondi particulièrement l'étude des alliages passivables. Ces matériaux performants apparaissent toutefois sensibles aux conditions d'environnement (conditions hyperoxydantes générées par la radiolyse de l'eau, température, présence d'espèces agressives, en particulier de chlorures), et pourraient alors subir une corrosion par piqûres, renvoyant à une approche probabiliste de la résistance à la corrosion localisée.

Les aciers non alliés présentent l'inconvénient d'être corrodables dans les conditions du stockage. Cependant, le processus de corrosion d'un acier non allié est aujourd'hui bien maîtrisé. Vis-à-vis de la corrosion aqueuse, un ensemble de résultats expérimentaux et de modélisations montre que la corrosion généralisée est le mécanisme dominant à moyen et long terme. La vitesse de corrosion généralisée, traduisant l'épaisseur de métal corrodée en fonction du temps, peut être quantifiée sur la base de modèles validés expérimentalement. Une corrosion localisée, par piqûres ou par effet de crevasse, peut être observée sur ces matériaux notamment en présence d'oxygène, mais, expérimentalement, la vitesse de corrosion localisée observée aux temps courts décroît plus vite que celle de la corrosion généralisée, de sorte que son importance relative diminue dans le temps. Enfin, les risques de corrosions spécifiques tels que la corrosion sous contrainte ou la fragilisation par l'hydrogène restent secondaires par rapport aux autres mécanismes de corrosion. Les analogues archéologiques en fer datant de plus de 2 000 ans confortent l'évaluation des processus de corrosion et fournissent un repère temporel quant à la durabilité des aciers sur une échelle de temps significative [47].

Par ailleurs, les modèles de corrosion des aciers non alliés sont tolérants vis-à-vis de la chimie de l'eau en milieu anoxique, de sorte qu'ils exigent une précision moindre sur les conditions d'environnement chimique [47]. Ils sont également tolérants vis-à-vis de la composition du métal, de son état structural et de son état de surface. Cet élément limite considérablement le risque que des défauts conséquents ne dégradent l'étanchéité et la durabilité de l'objet, en particulier au niveau des soudures.

Enfin, les aciers non alliés bénéficient d'une très bonne soudabilité et d'un grand retour d'expérience des techniques de soudure, éprouvées sur de fortes épaisseurs.

En conclusion, les aciers non alliés ont été privilégiés à ce stade, pour le caractère maîtrisé et prédictible de son processus de corrosion et parce qu'il se soude aisément.

● **Mode de soudure des composants du surconteneur**

Les procédés avec métal d'apport de type TIG (Tungsten Inert Gas), MIG (Metal Inert Gas), MAG (Metal Active Gas) nécessitent plusieurs passes successives de soudage. Leur mise en oeuvre conduit à des temps de soudage longs, rendant ces procédés peu adaptés au soudage de pièces de fortes épaisseurs. D'autre part, ces procédés engendrent une extension importante de la zone thermiquement affectée.

Le procédé Laser YAG (Yttrium Aluminium Garnet) est un procédé récent avec métal d'apport. L'application à des fortes épaisseurs d'acier en est encore à un stade de développement³⁶. Ce procédé bénéficie en revanche de références industrielles pour le soudage d'acier de faible épaisseur allant jusqu'à 10 millimètres (usine de Tokai Murai au Japon, atelier MOX à Cadarache, installation Atalante à Marcoule).

Le procédé de soudage par friction est un procédé sans métal d'apport actuellement en cours de développement en Suède par SKB pour le soudage de conteneurs à base de cuivre. Ce procédé n'apparaît pas aujourd'hui directement transposable pour le soudage de fortes épaisseurs d'acier.

Le procédé de soudage par faisceau d'électrons (FE) est un soudage sous vide, sans métal d'apport. Ce procédé présente un grand nombre d'avantages. En premier lieu, il s'agit d'un procédé éprouvé industriellement sur des fortes épaisseurs, allant jusqu'à 200 millimètres. Vis-à-vis de la qualité des soudures réalisées, la zone de métal affectée thermiquement par la soudure (ZAT) est d'extension limitée. De plus, ce procédé offre des qualités métallurgiques de la ZAT proches de celles du matériau de base, ce qui est favorable vis-à-vis des phénomènes de corrosion. Le soudage sous vide limite notamment le risque de fissuration à froid. Sur le plan de la mise en oeuvre opérationnelle, la possibilité d'un soudage en une seule passe limite le temps nécessaire et l'absence de métal d'apport est favorable à une application en cellule irradiante. Enfin le procédé est aisément automatisable.

En conclusion, parmi tous ces procédés, l'Andra a privilégié à ce stade le procédé par faisceau d'électrons (FE) au regard des avantages qui sont énoncés ci-dessus. Cette préférence n'exclut pas, à terme, un réexamen de ce choix.

● **Nombre de colis primaires par surconteneur**

Il est techniquement envisageable de placer un ou plusieurs colis primaires dans le surconteneur, avant de descendre le colis de stockage dans les installations souterraines. Cependant, le couplage thermique qui résulterait de la mise en place de deux colis primaires côte à côte, limiterait la flexibilité en matière de gestion de leur dégagement thermique. En effet, pour permettre une mise en stockage des colis types C1 à C4 (voir le chapitre 3) après une durée d'entreposage de 60 à 70 ans, il apparaît nécessaire de répartir aussi harmonieusement que possible les sources de puissance thermique en écartant les colis primaires les uns des autres (ce point est développé au chapitre 5). Enfin, le fait d'augmenter le nombre de colis primaires par surconteneur conduirait à des opérations de mise en alvéole plus complexes³⁷.

En conclusion, l'Andra a préféré à ce stade l'option d'un surconteneur individuel, notamment pour la flexibilité offerte par cette option en termes de gestion du dégagement thermique des déchets.

4.2.2.3 La solution retenue

La solution retenue pour sa simplicité et sa robustesse au regard des connaissances et des techniques actuelles, consiste en un surconteneur individuel en acier non allié de 55 mm d'épaisseur [50]. Le surconteneur est composé d'un corps et d'un couvercle constitués du même matériau. Après l'introduction du colis primaire dans le corps, le couvercle est soudé sur ce dernier par la méthode du faisceau d'électrons. L'ensemble peut ensuite être transféré dans les installations souterraines de stockage.

L'épaisseur conférée au corps et au couvercle est le résultat de la double prise en compte d'une étanchéité à l'eau durable et des sollicitations mécaniques. Vis-à-vis de la corrosion, elle comprend une

³⁶ Ce développement est effectué dans le cadre de la CLFA (Coopération Laser Franco-Allemande) ; il vise notamment le soudage de pipelines et celui du « vacuum vessel » du projet de réacteur ITER ; il est aussi considéré par le CEA pour la réalisation de conteneurs d'entreposage de longue durée.

³⁷ Une alternative au surconteneurage consisterait à rendre durablement étanche le chemisage de l'alvéole de stockage (voir chapitre 5), dont la fonction de base est d'assurer son soutènement mécanique. Une tel concept qualifiable de « surconteneur collectif » supposerait de réaliser les tronçons de chemisage avec l'épaisseur nécessaire et de souder ces tronçons (ainsi que les pièces terminales) en conditions in situ, sur toute leur épaisseur. Cette option apporte moins de garantie sur la qualité de l'objet réalisé que celle consistant à fabriquer le surconteneur en atelier de surface. En outre, dans la configuration où les colis de stockage sont espacés les uns des autres pour des raisons thermiques, cette solution nécessiterait un volume global d'acier plus important que dans le cas du surconteneur individuel.

partie « consommable » correspondant à l'épaisseur affectée par une corrosion généralisée pendant la durée considérée.

La forme cylindrique du surconteneur minimise les vides internes au colis de stockage, car elle épouse la forme du colis primaire. En outre des inserts compensant les vides formés par le profil de la tête et du fond des colis primaires contribuent à minimiser les jeux fonctionnels entre le colis primaire et le surconteneur.

Il est envisagé de doter le colis de stockage de patins en céramique, 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 colis lors de sa manutention horizontale dans l'alvéole. Elle contribue, en lien avec les moyens de manutention présentés à la section 9.3.3, à limiter les jeux autour du colis. De plus, elle maintient durablement un espace entre l'enveloppe du colis et le chemisage de l'alvéole, évitant ainsi qu'une zone confinée ne favorise le développement d'une corrosion localisée du surconteneur.

Par ailleurs, le système de préhension intégré au couvercle de l'objet peut être conçu de manière à limiter les vides résiduels extérieurs au colis. Cette conception est illustrée par la Figure 4.2.1.

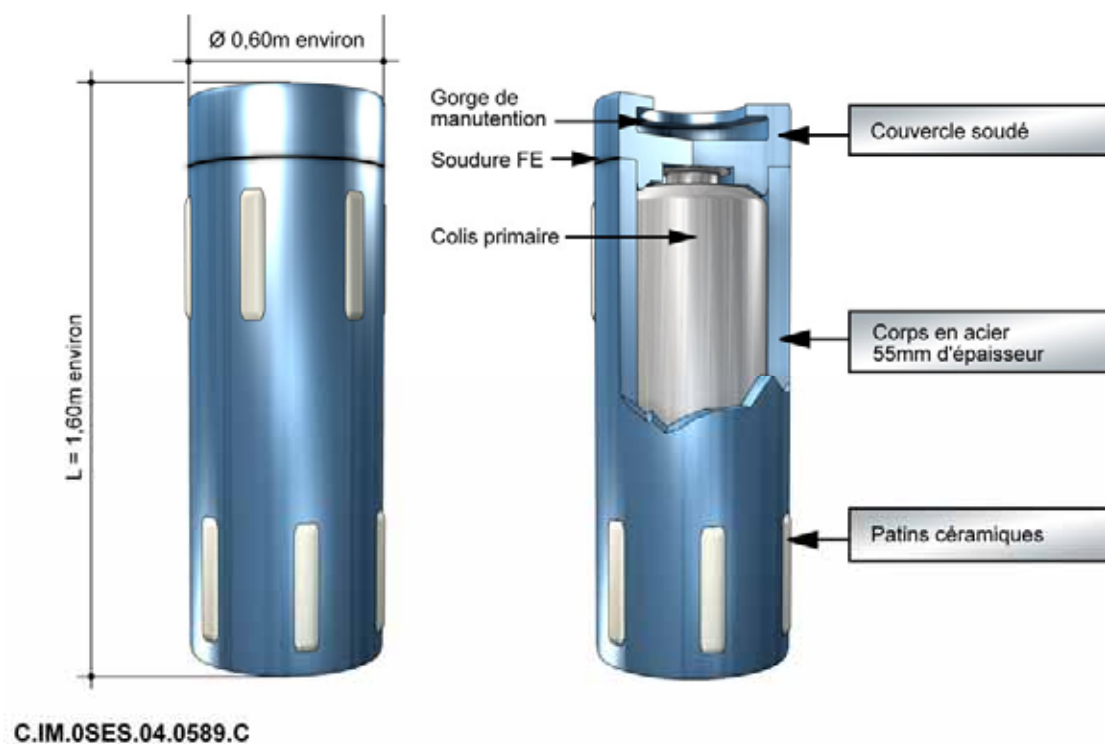


Figure 4.2.1 Principe du surconteneur de déchets C

4.2.2.4 Comparaison avec les options étudiées dans d'autres pays

La plupart des études menées dans les autres pays envisagent de compléter les colis primaires de déchets vitrifiés par un surconteneur.

Au Japon [51] et en Suisse [44], une fabrication en acier épais, non ou faiblement allié, est envisagée. Les objectifs de durabilité sont comparables à ceux retenus par l'Andra. Les épaisseurs envisagées sont en revanche plus importantes ; cela correspond au choix de s'affranchir complètement de la corrosion radiolytique, alors que celle-ci est prise en compte dans le dimensionnement vis-à-vis de la corrosion réalisée par l'Andra grâce notamment à l'épaisseur d'acier affectée à la tenue mécanique du colis (voir infra). De plus, dans le concept développé au Japon, une fonction supplémentaire de protection biologique est allouée au conteneur.

Aux Etats-Unis [52], le projet « Yucca Mountain » envisage un conteneur constitué de deux enveloppes concentriques dont une enveloppe interne en acier inox d'environ 50 mm d'épaisseur pour assurer la tenue mécanique et une enveloppe extérieure en alliage de nickel (Inconel 22) d'environ 20 mm d'épaisseur pour assurer la résistance à la corrosion. Ces matériaux répondent aux conditions d'environnement physico-chimique très spécifiques du projet Yucca Montain. Ce conteneur de dimensions plus grandes (diamètre) que celui de l'Andra pourrait, dans la section, recevoir plusieurs colis primaires de déchets (HLW) équivalents aux déchets C vitrifiés.

4.2.3 Description, performance

Cette section décrit plus en détail les paramètres de conception de la solution retenue. Elle en justifie le dimensionnement, au regard de la performance de durabilité attendue, et elle montre la compatibilité de l'objet avec les procédés de manutention.

4.2.3.1 Description détaillée

Deux colis de stockage, aux dimensions standardisées, permettent de couvrir l'ensemble des colis primaires de déchets C qui ont été présentés au chapitre 3 :

- une géométrie dite « courte » (longueur 1 291 millimètres, pour un diamètre hors tout de 655 millimètres) correspond aux deux colis types C0.1 (déchets vitrifiés PIVER) et C0.3 (déchets vitrifiés AVM) ;
- une géométrie dite « longue » (longueur 1 607 millimètres pour un diamètre hors tout de 590 millimètres) correspond aux colis types C0.2 (CSD-V R7/T7 /UMo), et C1 à C4 provenant des usines de La Hague.

La masse de ces colis de stockage varie entre 1 645 kilogrammes (colis type C0.1) et 1 965 kilogrammes (colis types C0.2 et C1 à C4). Cette masse comprend le colis primaire et l'ensemble des constituants du surconteneur, décrits en détail ci-après.

● Le corps

Le corps du surconteneur est constitué d'une virole cylindrique d'épaisseur utile 55 millimètres, permettant d'assurer l'étanchéité sur une durée millénaire (voir infra). Cette enveloppe est dotée de patins de glissement en céramique. Dans le cas d'une fixation de ces patins par encastrement, l'épaisseur de l'enveloppe serait augmentée de 10 millimètres afin de ne pas nuire à l'intégrité de l'épaisseur utile. Le fond présente une épaisseur utile de 77 ou 83 millimètres suivant les colis types. Il est possible de fabriquer en une seule pièce, sans soudage, le corps avec fond intégré.

Après avoir comparé diverses nuances possibles³⁸, le matériau privilégié est l'acier non allié type P235. Sa faible teneur en carbone lui confère une bonne soudabilité. Sa structure est peu sensible à la fissuration à froid lors du soudage, du fait d'une faible limite élastique. Il ne nécessite aucun préchauffage, ni traitement thermique respectivement avant et après soudure. Par ailleurs, ses caractéristiques mécaniques, bien qu'il s'agisse d'un acier d'usage courant, suffisent à assurer la résistance mécanique de l'objet. Enfin, ses caractéristiques mécaniques sont favorables à la maîtrise de certains risques (en particulier corrosion sous contrainte et fragilisation par l'hydrogène).

● Le couvercle

Le couvercle est réalisé dans la même nuance d'acier que le corps. Il est plus épais que le fond car à son épaisseur utile s'ajoute une épaisseur d'environ 100 millimètres pour la création d'une interface de manutention. Cette interface de manutention est constituée d'une gorge usinée permettant la préhension du surconteneur à l'aide d'un grappin. Une forme en creux, offre plus de surface portante et par conséquent une meilleure répartition des charges qu'une forme en saillie de type « champignon ». La forme interne du couvercle illustrée par la Figure 4.2.2 s'adapte au profil supérieur du colis primaire pour participer à la limitation des taux de vide.

³⁸ Dont en particulier l'acier faiblement allié 16MnD5 utilisé pour les cuves de réacteurs à eau sous pression

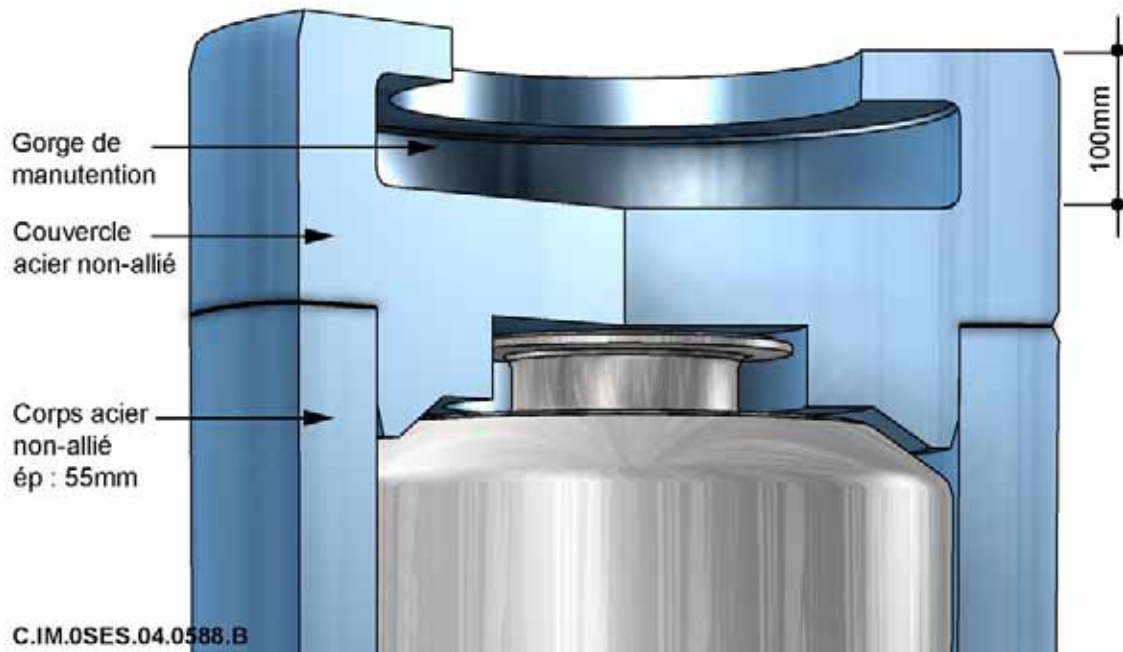


Figure 4.2.2 Détails du couvercle du colis de stockage (C02, C1 à C4)

● **Les patins en céramique**

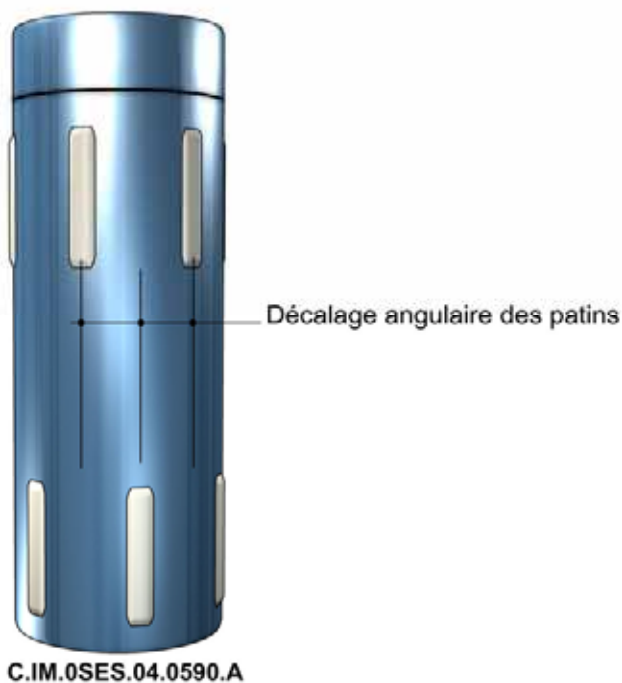


Figure 4.2.3 Implantation des patins

Le surconteneur est équipé de patins en céramique disposés longitudinalement. Chaque patin peut être constitué d'un élément métallique revêtu d'une fine couche de céramique ou d'un bloc de céramique massive. Les patins sont répartis sur le surconteneur en deux ensembles de six. Chaque ensemble présente un décalage angulaire de 30 degrés tel qu'illustré sur la Figure 4.2.3 de façon à ce qu'en situation d'appui sur l'intrados du chemisage, trois patins soient toujours en contact direct avec le chemisage de l'alvéole.

4.2.3.2 Performances

● Épaisseur de l'enveloppe et durée de vie

Le surconteneur décrit au paragraphe précédent présente, en situation de stockage, une durée d'étanchéité à l'eau a minima millénaire.

Cette durée couvre la phase thermique, pendant laquelle la température à coeur du verre excède 50 °C. En effet, la phase thermique³⁹ est évaluée à environ 150 ans pour les colis types C0, environ 500 ans pour les colis types C1/C2, et environ 1 000 ans pour les colis types C3/C4 (voir Figure 4.2.4). Ces évaluations résultent d'une modélisation numérique tridimensionnelle de la conduction de la chaleur dans le stockage (cette modélisation et ses données d'entrée sont décrites à la section 5.2). Elles sont fondées (i) sur un âge à la mise en stockage de 60 ans à 70 ans, respectivement pour les colis types C1/C2 et C3/C4, (ii) sur une configuration des alvéoles de stockage et de l'architecture d'ensemble dimensionnée⁴⁰ pour une température maximale de 100 °C à l'interface entre le colis de stockage et l'alvéole [10].

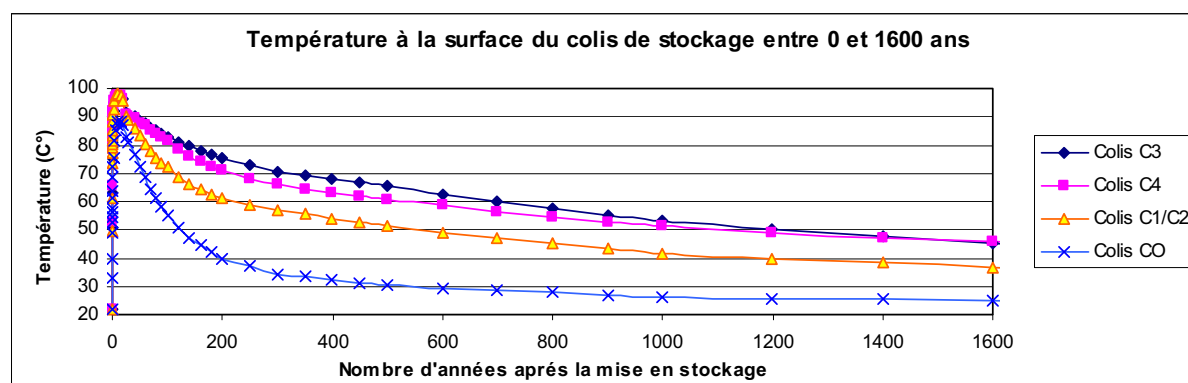


Figure 4.2.4 Evolution avec le temps, de la température des conteneurs de déchets vitrifiés

Pour assurer une étanchéité a minima millénaire, le dimensionnement de l'épaisseur utile du surconteneur retient la somme des deux termes suivants :

- une épaisseur de 28 millimètres pour la virole et 50 millimètres pour le fond et le couvercle, qui assure la résistance de l'objet vis-à-vis des contraintes mécaniques susceptibles de s'exercer à cette échelle de temps ;
- une surépaisseur de 27 millimètres, définie de manière pénalisante et correspondant à la perte de substance par corrosion généralisée.

● Dimensionnement mécanique

Le dimensionnement du surconteneur lui permet d'abord de résister aux sollicitations liées à sa manutention en position verticale dans les installations de surface et de transfert, et en position horizontale lors de la mise en alvéole de stockage. Ce point sera traité à la section 4.2.3.3.

Dans l'alvéole de stockage, tant que le chemisage de celle-ci est intègre, les colis ne sont soumis à aucune contrainte mécanique. Toutefois, à terme, le chemisage se corrode et perd progressivement sa résistance mécanique. Les déformations différées de la roche, referment le jeu entre la roche et le chemisage puis exercent sur le chemisage une pression qui croît lentement (estimée à 300 ans à environ 5 MPa au maximum [13]).

³⁹ La durée de la phase thermique augmente avec la température maximale retenue dans le stockage. Elle est aussi fonction de l'âge du déchet à la mise en stockage. La phase thermique est également sensible à la modularité de la zone de stockage : elle diminue avec l'augmentation de l'emprise de chaque module et avec les distances entre modules.

⁴⁰ Les concepts étudiés se fondent sur une dissipation de la chaleur par conduction dans la roche.

À cette pression due au fluage et à la resaturation des argilites, s'ajoute transitoirement une contrainte thermomécanique générée par le dégagement thermique des colis. Au-delà de quelques siècles la température tend à s'uniformiser dans et autour de l'alvéole. La contrainte thermomécanique a alors diminué (d'une valeur maximale de 4 MPa, à une valeur résiduelle estimée à 1,6 MPa environ [13]).

Lorsque le chemisage perd sa résistance, il se déforme et la poussée du terrain est alors transmise aux colis de stockage. À l'échéance de 1 000 ans, sans prendre en compte de manière conservatrice la dissipation partielle de la poussée du terrain, la pression radiale appliquée sur les colis est au plus de 7 MPa (contrainte effective à 500 mètres).

Simultanément, la pression interstitielle augmente lentement pour rétablir une pression uniforme égale à la pression initiale de 5 MPa. Cette montée en pression interstitielle est ralentie par la présence des gaz de corrosion, qui s'évacuent lentement. Compte tenu des incertitudes sur les cinétiques de ces phénomènes, l'effet de ces gaz est ici négligé. On considère que le colis pourrait alors être soumis à l'échelle de 1 000 ans, à une pression supplémentaire, au plus égale à la pression initiale de l'eau interstitielle, soit 5 MPa.

Dans la direction axiale, la contrainte naturelle plus forte que dans la direction radiale accentue l'effet des déformations différées en fond d'alvéole. Cet effet est néanmoins localisé et couvert par les marges prises pour déterminer la pression radiale.

Ainsi, l'Andra a retenu de dimensionner le surconteneur pour résister à une pression de 12 MPa appliquée uniformément sur les parois après une perte de métal de 27 millimètres correspondant à la corrosion généralisée (voir infra).

Les contraintes admissibles du matériau (acier P235) sont de 360 MPa pour la limite à la traction, et 200 et 185 MPa de limite élastique pour des températures respectives de 20 °C et 55 °C. Des épaisseurs de 28 millimètres en paroi et environ 50 millimètres pour le fond permettent de respecter ces contraintes admissibles. En effet, les calculs de dimensionnement montrent que les contraintes de traction exercées sur la virole sont inférieures (de l'ordre de 100 MPa [50]).

● **Durée d'étanchéité**

La corrosion généralisée est le principal processus à prendre en compte dans le cas de la corrosion des aciers non alliés [53].

Dans ce contexte, on distingue trois périodes successives dans la vie du colis en situation de stockage : une période initiale d'absence de corrosion, une période transitoire de corrosion en conditions oxydantes et, enfin une période de corrosion en conditions anoxiques.

Période initiale

Dans un premier temps, l'humidité relative de l'alvéole est faible du fait de l'exothermicité des colis, elle ne permet pas la formation d'un film d'eau sur les colis, la corrosion ne peut s'amorcer. La température est néanmoins suffisamment basse (moins de 100 °C) pour que la corrosion par l'oxygène gazeux⁴¹ soit négligée.

Période transitoire (oxydante et/ou resaturation)

Dès que l'humidité relative de l'atmosphère de l'alvéole dépasse une valeur critique⁴², un film d'eau se dépose au contact du colis et la corrosion peut s'amorcer. L'espèce oxydante prépondérante pendant cette phase est l'oxygène dissous dans l'eau.

Le renouvellement de l'oxygène est limité par des dispositions constructives (mise en place rapide d'un capot d'étanchéité en tête de l'alvéole). De plus, il est consommé préférentiellement par la corrosion des éléments métalliques rencontrés avant le colis, en particulier le chemisage. Aussi, cette phase, si elle existe, sera de courte durée (de l'ordre de la dizaine d'années). Durant cette phase, la

⁴¹ Au maximum de l'ordre de quelques centièmes de micromètres par an.

⁴² La corrosion aqueuse ne peut s'amorcer tant que l'humidité de l'atmosphère de l'alvéole reste inférieure à une "humidité relative critique", comprise entre 40 % et 70 %, selon la composition de l'atmosphère.

vitesse de progression de la corrosion du colis de stockage dépend des cinétiques des phénomènes⁴³ et prend en compte le rôle protecteur de la couche des produits de corrosion. Sur la base d'essais de corrosion en milieu argileux, une loi semi-empirique donne des vitesses de corrosion généralisée d'au plus quelques dizaines de $\mu\text{m}/\text{an}$.

Période anoxique

Une fois l'oxygène consommé, le milieu redevient anoxique comme à son état initial, la corrosion aqueuse (par réduction de l'eau) en milieu anoxique devient prépondérante.

La forte épaisseur du surconteneur limite la corrosion radiolytique due à des espèces oxydantes, comme H_2O_2 (« eau oxygénée »), qui seraient créées par radiolyse de l'eau sous l'effet du débit de dose $\beta\gamma$ en surface du conteneur.

La vitesse de corrosion généralisée observée dans ces conditions sur des essais de corrosion de longues durées (plusieurs années) diminue dans le temps du fait du renforcement du pouvoir protecteur des couches de produits de corrosion. Les vitesses moyennes observées sur des échantillons tendent vers des valeurs très faibles entre 3 et 5 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour une température comprise entre 50 à 90 °C, avec des vitesses instantanées inférieures au $\mu\text{m}/\text{an}$ après quelques années.

En retenant des hypothèses conservatives, une épaisseur affectée à la corrosion de 27 millimètres confère au surconteneur une durée d'étanchéité de 4 000 ans.

4.2.3.3 Compatibilité avec les moyens de manutention

Le dimensionnement relatif à la tenue mécanique du surconteneur soumis à une pression extérieure de 12 MPa et sa tenue à la corrosion sur une échelle de temps millénaire étant établis, le colis doit également être compatible avec les moyens de manutention retenus, présentés au chapitre 9.

Trois configurations principales du cycle de manutention du surconteneur sont prises en compte dans la conception et le dimensionnement. La première correspond à la manutention verticale du colis de stockage lors des opérations d'entreposage temporaire préalablement au transfert vers le puits de descente. La deuxième correspond à la mise en alvéole de stockage. Enfin la troisième fait référence à l'hypothèse d'un retrait éventuel des colis.

● Prise en compte des opérations de manutention verticale dans les installations de surface

À l'issue de la fabrication des colis de stockage dans les installations de surface, ceux-ci sont entreposés verticalement. Ils sont ensuite repris et introduits dans une hotte de protection radiologique pour le transfert vers les installations souterraines. Lors de ces opérations la hauteur de survol est d'environ 1,60 mètre. Dans le cadre de ces opérations, le dimensionnement consiste à calculer l'épaisseur de l'interface de manutention et à vérifier la tenue du colis à la chute.

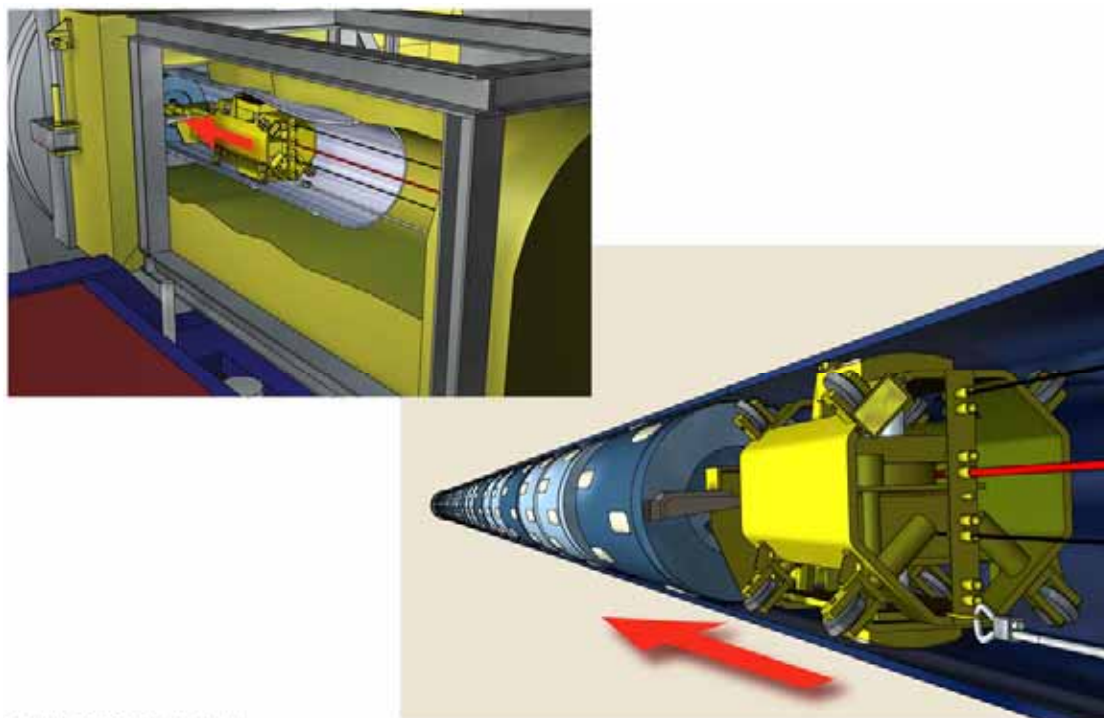
La contrainte admissible (116 MPa) sur le matériau constituant la gorge de manutention du surconteneur est celle définie par les règles de calcul des appareils de levage de la Fédération Européenne de la Manutention (FEM) soit les 2/3 de la limite élastique. Les dimensions de cette gorge lui confèrent un caractère robuste au regard de toutes les sollicitations induites par les opérations de manutention et au-delà, lors de la mise en charge mécanique qu'elle subira en situation de stockage.

Plusieurs cas de chute de colis ont été simulés, notamment une chute en angle avec une hauteur de 1,6 mètre, correspondant à la hauteur de survol dans les installations de surface. Ces calculs ont permis de vérifier la tenue du colis.

⁴³ Oxydoréduction et transport de l'oxygène en lien avec la resaturation.

- **Prise en compte des opérations de mise en alvéole de stockage**

Le principe de transfert des colis de stockage C dans une alvéole de stockage illustré par la Figure 4.2.5 est réalisé par glissement du colis dans le chemisage de l'alvéole à l'aide d'un robot pousseur.



C.IM.0SES.04.0469.A

Figure 4.2.5 *Principe de mise en alvéole du colis de stockage C*

Le glissement s'effectue par frottement des patins en céramique sur l'intrados du chemisage métallique. La fonction essentielle de ces patins est de faciliter le glissement et donc de limiter les efforts de poussée. De plus, en évitant le contact direct acier/acier du colis sur le chemisage, les patins évitent l'endommagement du corps lors de la poussée.

Le choix de la céramique est largement inspiré de son utilisation industrielle dans d'autres domaines tels que l'aéronautique ou l'automobile. Ce matériau est intéressant pour son bon coefficient de frottement, sa résistance à l'usure, et sa résistance à la compression.

- **Prise en compte d'une opération éventuelle de retrait**

Dans le cadre d'un éventuel retrait des colis, on a envisagé le cas où la corrosion généralisée des colis de stockage et du chemisage de l'alvéole constituerait une gêne à la conduite de cette opération.

Pour le dimensionnement de la gorge de préhension du colis dans une telle situation, il est fait l'hypothèse qu'une corrosion généralisée (2 mm)⁴⁴ affecte toutes les faces externes de la gorge de manutention. La prise en compte de cette situation dans le dimensionnement consiste à vérifier qu'il est possible de saisir le colis et exercer un effort de traction significatif pour vaincre les forces de frottement et de collage engendrées par la corrosion. Le calcul donne un effort maximal applicable, correspondant à la limite élastique, d'environ 40 tonnes. L'atteinte de la contrainte à la rupture, permettrait théoriquement de développer un effort de traction d'environ 85 tonnes avec toutefois un risque de détérioration de la gorge de manutention pouvant conduire à sa ruine.

On notera par ailleurs que les patins en céramique du conteneur limitent le risque à terme de « collage » par des produits de corrosion entre les colis et le chemisage.

⁴⁴ Une corrosion de 2 mm engendre une surépaisseur de produits foisonnés de 3 mm par rapport aux côtes initiales (l'épaisseur totale des produits de corrosion est donc de 5 mm). Le dimensionnement géométrique de la gorge tient compte de cette épaisseur de corrosion afin que l'espace central résiduel soit suffisant pour permettre le déploiement des doigts d'un outil spécifique de reprise.

4.2.4 Techniques de fabrication

Cette section expose les techniques de fabrication du colis de stockage envisageables sur la base d'analogies industrielles existantes.

La fabrication s'effectuerait en deux phases. La première concerne la fabrication en usine des composants du surconteneur ; un aspect particulier est l'intégration des patins sur le corps de l'objet. La seconde phase comprend la mise en place du colis primaire de déchets vitrifiés dans le surconteneur et la fermeture du colis de stockage par soudage pleine pénétration de son couvercle. Cette seconde phase est réalisée dans une succession de cellules blindées.

4.2.4.1 Fabrication du conteneur et de son couvercle en usine

Les composants à fabriquer sont un corps en acier non allié (P235) équipé de patins céramiques, et un couvercle. Diverses techniques sont envisageables, elles sont éprouvées au plan industriel, pour des dimensions et épaisseurs d'acier au moins égales à celles du surconteneur [50]. À l'issue d'une analyse comparative, deux d'entre elles sont apparues particulièrement adaptées.

La première consiste à réaliser une virole par forgeage, puis à rapporter un fond. Pour fabriquer la virole, une première ébauche est obtenue à partir d'un lingot, et ensuite percée. Cette ébauche est alors mise en rotation sur un mandrin calibré qui est situé à l'intérieur de l'ébauche. Puis, elle est frappée de l'extérieur par un tas pour augmenter son diamètre extérieur. Le forgeage amène à refermer les défauts de compacité du lingot initial et à obtenir des pièces de structure fine exempte de défaut de compacité. Cette technique a été mise en oeuvre pour la réalisation d'un démonstrateur de conteneur de stockage de combustibles usés (Cf. § 4.3.4.1). La fabrication du fond est réalisée séparément, par la mise en oeuvre de moyens comme le moulage statique, l'estampage, le forgeage ou l'utilisation de tôles laminées découpées et soudées. La virole et le fond sont ensuite assemblés par soudage en pleine épaisseur pour former le corps du conteneur.

La seconde technique consiste à réaliser le corps en une seule pièce, par perçage – étirage. Cette technique présente l'avantage d'éviter le soudage du fond. La cavité intérieure du conteneur est obtenue par déformation de métal. Le perçage – étirage consiste à obtenir un tube à partir d'un lingot. Le lingot qui sort du four est percé à chaud avec un mandrin à l'aide d'une presse verticale pour obtenir le diamètre intérieur, puis étiré par laminage à l'aide d'une presse horizontale dans une filière, pour obtenir le diamètre extérieur ainsi que la longueur recherchés (voir Figure 4.2.6 et Figure 4.2.7). La pièce subit ensuite un traitement thermique, puis elle est usinée pour mise aux dimensions finales.



Figure 4.2.6 *Lingot - Perçage – Etirage*



Figure 4.2.7 Opération d'étirage dans une filière à l'aide d'un mandrin et d'une presse horizontale

Ces deux techniques correspondent à des méthodes industrielles éprouvées qui permettent d'obtenir de bonnes qualités métallurgiques de l'objet fabriqué.

4.2.4.2 Fabrication et intégration des patins de glissement en céramique

● Fabrication et performances des patins céramique

À ce stade, le corindon (alumine Al_2O_3), ou le corindon dopé ($Al_2O_3 + ZrO_2, Y_2O_3$) sont apparus comme matériaux intéressants pour leurs caractéristiques mécaniques et leur caractère isolant. Des tests en atelier à l'aide d'un banc d'essais ont permis de constater la plus grande robustesse d'un patin réalisé en céramique massive en comparaison d'une céramique projetée sur une embase métallique. Les patins utilisés pour ces essais sont illustrés par la Figure 4.2.8 : de gauche à droite, un patin en céramique massive, un patin en céramique projetée puis la base métallique utilisée comme support à la projection de céramique.



Figure 4.2.8 Patins en céramique

Le banc d'essai illustré par la Figure 4.2.9 a permis de procéder à des déplacements alternés simulant les efforts sur les patins lors des opérations de poussée du colis (chargement et durée d'application). Il permet d'appliquer une charge verticale nominale de 1 tonne sur un patin⁴⁵ (Figure 4.2.10).

⁴⁵ La conception du surconteneur fait que celui repose sur 3 patins céramiques lors de la phase de mise en alvéole. Cette configuration est la représentation la plus stable, donc la plus probable que prendra le colis dans l'alvéole, aussi bien pendant la phase de poussée (même si ce n'est pas toujours le même patin qui supporte les efforts), que dans sa phase de repos. Dans cette configuration « tripode », la charge statique maximale supportée par l'un des patins peut atteindre la moitié du poids total du colis, soit environ 1 tonne.



Figure 4.2.9 Banc d'essais des patins

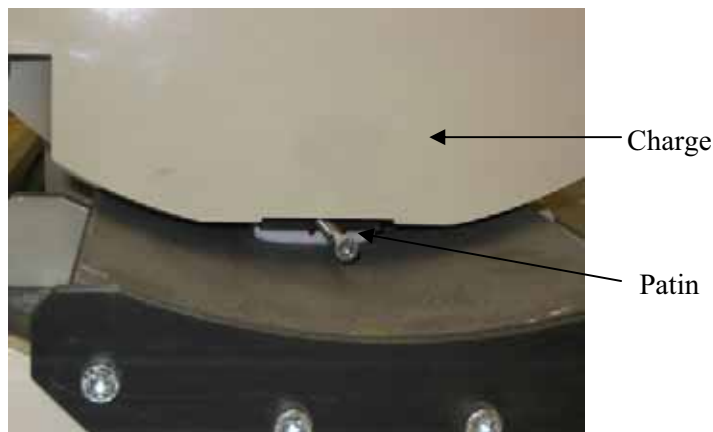


Figure 4.2.10 Patin en charge

Les essais réalisés avec un patin en céramique massive ont permis d'observer que la piste métallique subissait un léger marquage sans arrachement de métal et que l'effort nécessaire à la poussée était régulier et stabilisé à une valeur moitié de la masse déplacée, soit un coefficient de frottement de l'ordre de 0,5.

Pour ce type de céramique, les patins sont mis en forme par pressage de poudre, puis « frittés », c'est-à-dire portés à haute température pour obtenir leur consolidation. Après refroidissement, une opération d'usinage est nécessaire pour amener la pièce à sa cote nominale. La pièce peut être de forme assez complexe. Le matériau obtenu présente des caractéristiques homogènes et ne recèle pas de contraintes résiduelles.

● Mode d'intégration des patins céramique dans le colis de stockage

L'intégration des patins dans le colis de stockage ne doit pas affecter l'épaisseur utile de 55 mm d'acier. Cela impose une surépaisseur d'environ 10 mm pour permettre d'aménager des logements qui recevront les patins. Deux modes d'intégration sont possibles : (i) le collage direct⁴⁶ de patins en céramique massive dans ces logements usinés avec une tolérance définie pour obtenir une bonne tenue mécanique (notamment résistance aux sollicitations de cisaillement générées par les efforts de frottement sur le chemisage métallique), (ii) le soudage de patins de type composite céramique/métal⁴⁷ inséré dans ces logements et dont la partie métallique présente l'avantage de pouvoir être soudée dans la surépaisseur d'acier du surconteneur.

4.2.4.3 Assemblage du colis de stockage

L'assemblage du colis de stockage s'effectue en cellule blindée :

- la première opération est le chargement du colis primaire de déchets vitrifiés dans le conteneur. Un jeu fonctionnel permet d'effectuer ce chargement verticalement, de manière simple, en s'affranchissant des tolérances de fabrication du conteneur et des tolérances relatives au colis primaire ;
- le couvercle est ensuite posé sur le corps du conteneur. Puis l'ensemble est introduit dans une enceinte dans laquelle le vide est effectué, opération nécessaire au principe du soudage par faisceau d'électrons (FE). Le conteneur est alors mis en rotation, et le soudage orbital du couvercle effectué. La Figure 4.2.11 illustre une enceinte de soudage sous vide et la Figure 4.2.12 illustre le procédé de soudage FE.

⁴⁶ A l'aide de colle industrielle haute performance.

⁴⁷ Dans un premier temps, une céramique frittée massive est réalisée, puis rapportée mécaniquement sur une embase métallique de façon à obtenir ainsi le patin composite céramique / métal.

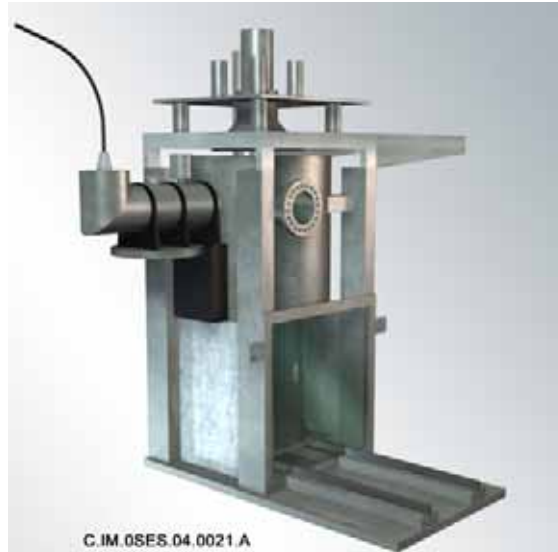
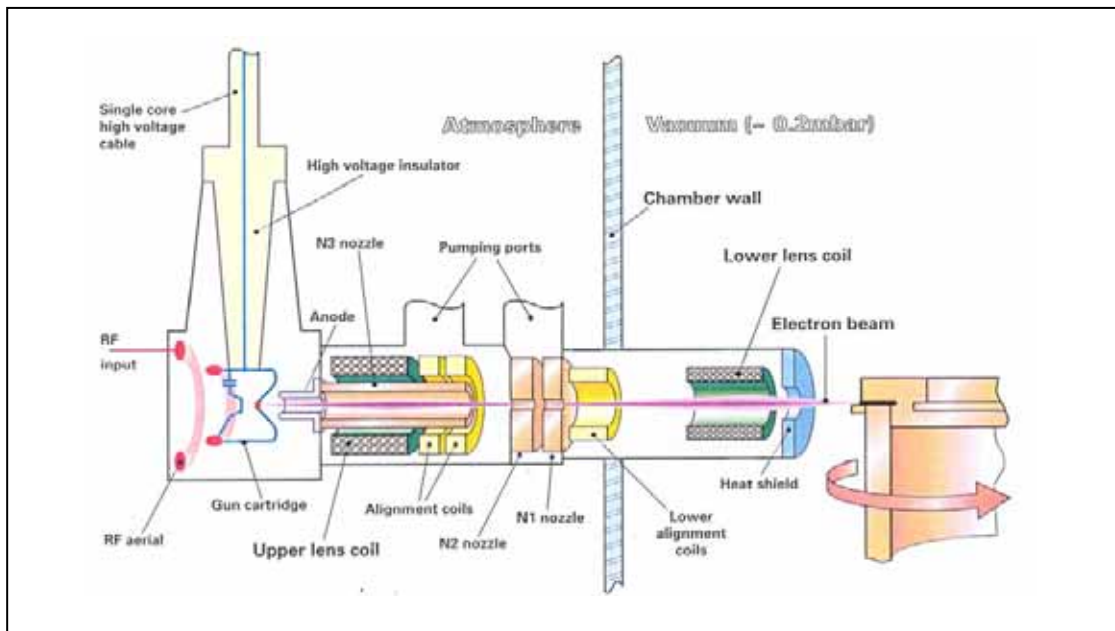


Figure 4.2.11 Enceinte de soudage sous vide



© TWI Ltd – Cambridge - UK

Figure 4.2.12 Schéma du procédé de soudage par faisceau d'électrons

Afin de maîtriser le processus de soudage, les paramètres importants peuvent être enregistrés au cours de l'opération. À l'issue du soudage, il doit ensuite être procédé à des contrôles de la soudure réalisée. Pour cela, le colis de stockage sera introduit dans une autre cellule blindée.

Un procédé adapté de contrôle surfacique de la soudure, couramment utilisé par les industriels, consiste en une inspection visuelle par caméra vidéo. Les autres procédés envisageables, à savoir le ressuage et la magnétoscopie, sont plus difficilement applicables en cellule irradiante.

Un procédé de contrôle volumique éprouvé est basé sur l'emploi d'ultrasons.

Il est à noter que le soudage par faisceau d'électrons, ainsi que des moyens de contrôle de la soudure, ont été mis en œuvre pour la réalisation des démonstrateurs de conteneurs de stockage de combustibles usés, avec la même nuance d'acier que celle envisagée ici pour le conteneur de stockage de déchets C (voir la section 4.3).

4.3 Les colis de stockage de combustibles usés

En liminaire, on rappelle que les combustibles usés ne sont pas considérés comme des déchets. Un conteneur de stockage est présenté ici à titre exploratoire, pour les combustibles usés de types CU1, CU2 et CU3, dans le cas où ceux-ci ne seraient pas retraités.

Le présent chapitre expose les considérations scientifiques et techniques à prendre en compte pour la conception d'un tel conteneur de stockage, les différentes réponses techniques envisageables et l'option privilégiée à ce stade des études.

Il présente également, dans un souci d'évaluation de faisabilité, le dimensionnement de ce conteneur et les techniques de fabrication.

4.3.1 Exposé des questions principales

Pour les assemblages combustibles REP (CU1, CU2) deux options de conditionnement initial des combustibles usés sont considérées : nu ou en étui individuel. Ces deux options offrent une flexibilité de gestion de ces combustibles en amont du stockage. L'étui individuel pris en compte est celui déterminé par les études sur l'entreposage de longue durée menées par le CEA pour les combustibles usés.

Les autres combustibles (type CU3) sont supposés conditionnés en étui dans les installations amont.

4.3.1.1 Besoin d'étanchéité et de durabilité

L'arrivée d'eau sur les assemblages combustibles engendre la corrosion des gaines et des parties métalliques (embouts et grilles), la mise en solution de l'activité labile et l'altération des pastilles de combustibles.

Les vitesses de corrosion des matériaux métalliques sont fonction du type de matériaux. La température et la radiolyse ont pour effet d'augmenter les vitesses de corrosion.

Les pastilles d'oxyde d'uranium (UO₂) irradiées, qui contiennent la plus grande partie de l'activité du combustible, se dégradent en présence d'eau par dissolution. La radiolyse de l'eau qui génère localement des espèces hyperoxydantes comme l'eau oxygénée (H₂O₂) est susceptible dans un premier temps d'accélérer cette dissolution.

Par ailleurs, comme cela a déjà été indiqué pour les déchets vitrifiés, le comportement des radionucléides dissous dans l'eau est affecté par la température.

Ces éléments conduisent à conférer au conteneur la fonction d'interdire l'arrivée d'eau sur les combustibles usés a minima pendant la phase thermique. On a retenu une durée minimale de 10 000 ans pour l'étanchéité du conteneur pour les combustibles de types CU1 et CU2 et une durée millénaire pour les types CU3.

4.3.1.2 Autres questions liées aux fonctions de sûreté

Les combustibles usés contiennent une masse de matière fissile résiduelle qui nécessite dans la conception du conteneur, de s'assurer de l'absence de risque de criticité. En effet, un combustible de type CU1 (UOX) contient en sortie de réacteur une masse de matière fissile résiduelle de l'ordre de 10 kg dont 4 à 5 kg d'²³⁵U et moins de 4 kg de ²³⁹Pu alors qu'un combustible CU2 (MOX) contient lui de l'ordre de 20 kg de matière fissile résiduelle dont plus de 80 % de plutonium, et en particulier 12 kg de ²³⁹Pu⁴⁸. Ces masses de matière fissile imposent une analyse détaillée sur la base de la géométrie du colis de stockage et des caractéristiques du milieu environnant l'assemblage combustible. Cette analyse doit couvrir toutes les phases de vie du conteneur de stockage en particulier à très long terme en tenant compte de l'évolution au cours du temps des masses de matières fissiles, des géométries et des matériaux constitutifs du colis de stockage et de son environnement.

⁴⁸ Pour mémoire, la masse critique du Pu239 est de 510 g.

4.3.1.3 Besoins opérationnels

De façon analogue aux déchets C, l'Andra a retenu pour l'étude une architecture de stockage en tunnels horizontaux. Le colis de combustibles usés doit donc lui aussi pouvoir être manutentionné horizontalement pour son transfert dans les galeries souterraines et sa mise en alvéole de stockage. Il convient également dans le cadre de la gestion réversible du stockage de s'assurer de son aptitude à être retiré pendant une durée a minima séculaire.

4.3.2 Principes de conception retenus

4.3.2.1 Choix des options techniques

Comme pour le surconteneur de déchets C, l'étanchéité est assurée par une virole métallique. Parmi les différentes familles de matériaux métalliques présentées dans la section 4.2, l'acier non allié a ici aussi été retenu, pour les mêmes raisons.

Comme pour les déchets C, l'épaisseur du matériau détermine la durée d'étanchéité. De même, la fermeture du conteneur par faisceau d'électrons a été retenue. On rappelle que ce procédé présente l'avantage de minimiser l'extension de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) et offre des qualités métallurgiques proches de celles du matériau de base vis-à-vis des phénomènes de corrosion

Pour respecter les critères de dimensionnement thermique du stockage, la capacité d'un colis est limitée à quatre assemblages combustibles REP de type CU1 (UOX/URE) et à un assemblage combustible de type MOX (CU2).

Le choix d'une faible capacité des colis limite ainsi la masse. Elle reste ainsi dans un domaine couvert par un retour d'expérience industriel vis-à-vis d'un transfert par le puits.

Un autre choix de conception important est la limitation des vides résiduels à l'intérieur du colis. Pour le colis contenant plusieurs assemblages, cela conduit à un objet massif dans lequel sont ménagés des logements ajustés aux dimensions des assemblages.

Plusieurs solutions ont été envisagées visant à obtenir un tel objet. Une fabrication d'un conteneur monobloc en acier coulé dont les logements viendraient de moulage, présente le risque d'obtenir une structure hétérogène ; une fabrication monobloc en acier forgé présenterait une structure plus homogène mais l'usinage de logements carrés pour assemblages nus sur de telles longueurs n'est pas technologiquement envisageable à ce stade. La fabrication d'une virole en acier et d'un insert séparé, insert obtenu par fonderie et qui serait emmanché par frettage dans la virole semble difficilement réalisable pour de telles dimensions et conduirait à des déformations et contraintes difficilement maîtrisables. Un simple emmanchement mécanique impliquerait un jeu important qu'il faudrait combler in fine. La coulée directe d'un insert en fonte dans la virole, après mise en place d'un moule constitué de tubes en acier pour former les logements, est retenue.

La fonte présente une résistance mécanique suffisante qui permet de confier à l'insert un rôle de tenue aux contraintes qui s'exercent à long terme sur le conteneur.

On notera que la fonte a été également choisie en Suède par SKB (voir infra et [49]) pour la réalisation de l'insert du conteneur pour combustibles usés.

4.3.2.2 La solution retenue

Ainsi, la solution retenue à ce stade, consiste en deux modèles de conteneurs cylindriques en acier non allié constitué d'un corps et d'un couvercle soudés entre eux par la méthode du faisceau d'électrons. Ces deux modèles se différencient par leurs diamètres externes et leurs aménagements internes qui sont liés au nombre d'assemblages combustibles qu'ils contiennent, et à leur mode de conditionnement (nu ou en étui) [54].

Le premier modèle (Figure 4.3.1) est de grand diamètre (de l'ordre de 1 250 mm pour une épaisseur de 110 mm d'acier), il contient quatre assemblages combustibles de type CU1 (UOX/URE) qui

représentent au total une puissance thermique de l'ordre de 1 600 W, après un entreposage de l'ordre de 60 ans après sortie du réacteur.

Le second modèle (Figure 4.3.2) est de petit diamètre (de l'ordre de 600 mm pour une épaisseur de 120 mm d'acier). Il ne contient qu'un seul assemblage. Pour les combustibles CU2 (MOX), la puissance thermique d'un tel conteneur est de l'ordre de 1 100 W, après un entreposage d'environ 90 ans après la sortie du réacteur. Ce second modèle peut aussi permettre d'accueillir un combustible UOX dont la réactivité, vis-à-vis du risque de criticité, serait plus élevée que celle des combustibles usés standard (voir ci-dessous).

Pour les combustibles CU3, le colis de stockage est analogue aux colis de stockage développé pour les colis C0.3. Le nombre d'étuis placés à l'intérieur d'un tel conteneur conduit à une puissance thermique inférieure à 150 W (soit celle du colis type C0) : dix étuis pour les combustibles types CU3.1.1, cinq étuis pour les CU3.1.2, un étui pour les CU3.2 et CU3.3.

Le modèle de grand diamètre illustré par la figure 4.3-1 est doté d'un insert en fonte dans lequel sont pratiqués quatre logements (de section carrée ou circulaire en fonction de la présence ou non d'un étui autour de l'assemblage). Cet insert assure la tenue mécanique du conteneur lors de sa mise en charge progressive et contribue, en séparant les assemblages, à la maîtrise du risque de criticité.

La conception du conteneur de petit diamètre est semblable à celle du surconteneur de déchets C, moyennant une épaisseur accrue d'acier, ainsi que l'illustre la Figure 4.3.2. La cavité cylindrique de la virole en acier permet d'accueillir directement l'assemblage (nu ou en étui).

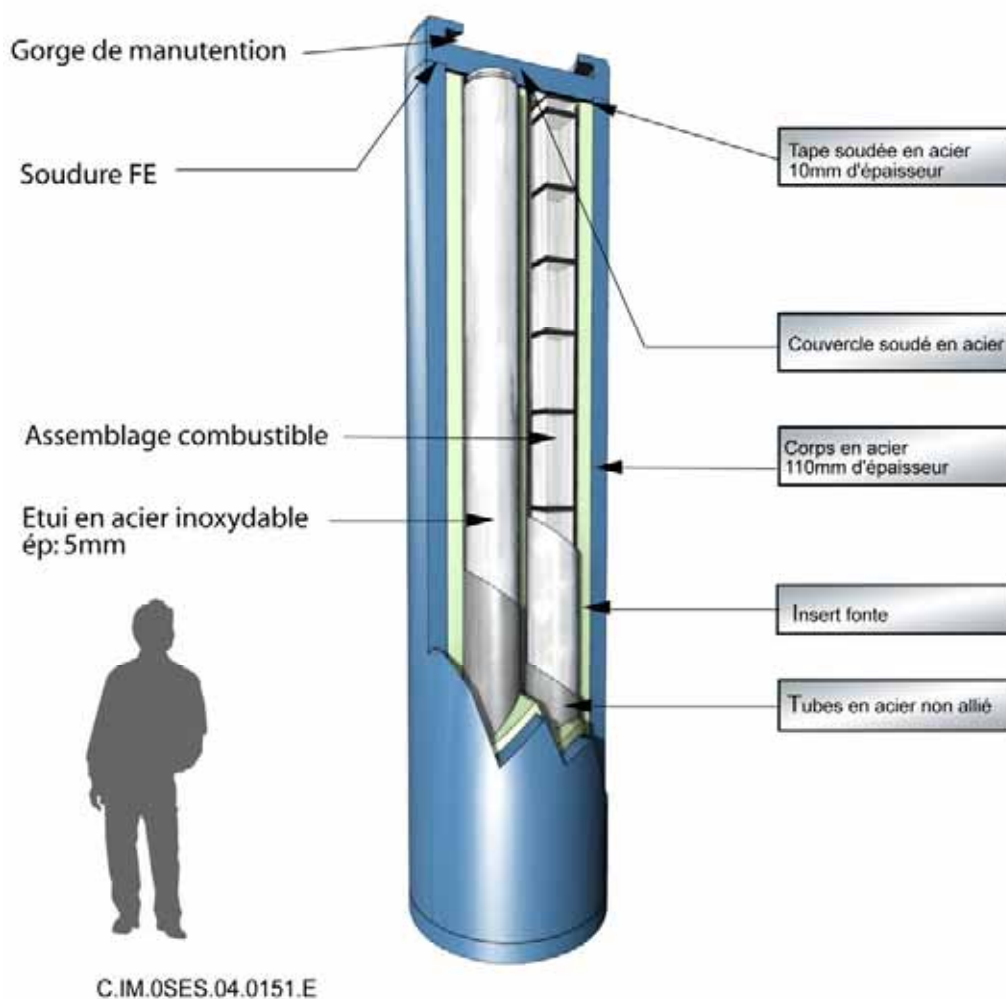
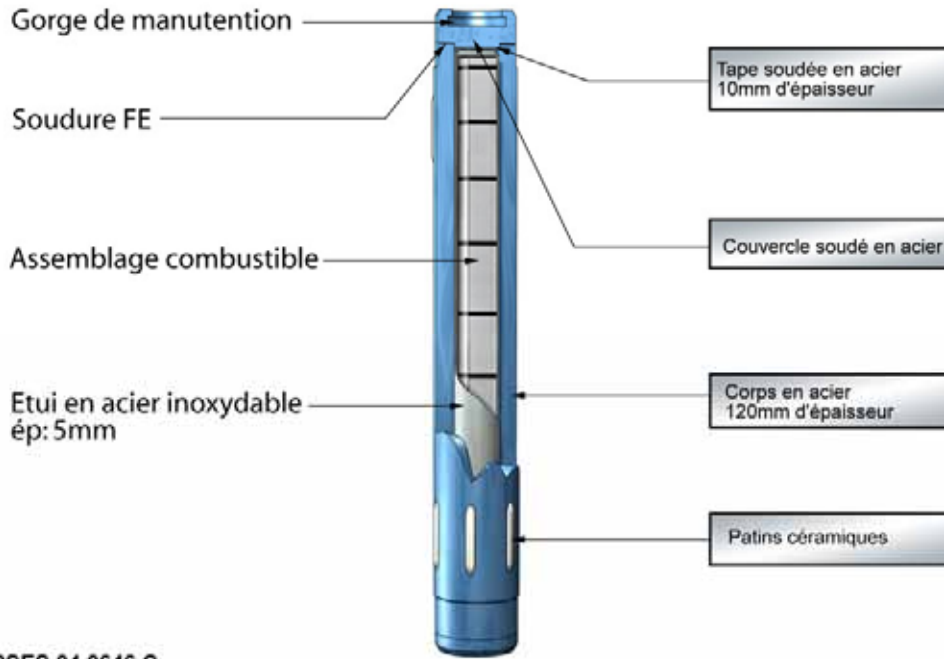


Figure 4.3.1 Colis de stockage de grand diamètre, 4 assemblages UOX ou URE



C.IM.0SES.04.0646.C

Figure 4.3.2 Colis de stockage de petit diamètre, 1 assemblage (UOX ou MOX)

4.3.2.3 Comparaison avec les solutions développées à l'étranger

Dans le concept de référence de la Nagra (Suisse) [44], les assemblages de combustibles usés sont placés dans un conteneur par 4 ou par 9 (selon qu'ils sont issus de réacteurs à eau pressurisée (REP) ou eau bouillante (REB)). Ce conteneur est en acier, il a un diamètre de 1 050 mm et une épaisseur de 150 mm. Il est dimensionné en vue d'une durabilité de 1 000 à 10 000 ans. Une variante considère un conteneur en cuivre, avec insert en acier, éventuellement en céramique. Cette variante apporte une durabilité accrue d'un ordre de grandeur.

En Suède, le projet KBS-3 [49] localisé dans un environnement granitique, envisage un conteneur en cuivre de 50 mm d'épaisseur contenant un insert en fonte pouvant recevoir 4 assemblages PWR ou 12 assemblages BWR. La durée d'étanchéité visée pour ce conteneur est supérieure à 100 000 ans.

En Finlande, le projet est similaire au projet Suédois KBS-3. Le Canada et l'Espagne envisagent également une conception de conteneur en cuivre.

Aux Etats-Unis [52], le conteneur envisagé pour les combustibles usés dans le cadre du projet « Yucca Mountain » est similaire dans son principe à celui des déchets HLW (une enveloppe interne en acier inox d'environ 50 mm d'épaisseur pour assurer la tenue mécanique et une enveloppe extérieure en alliage de nickel d'environ 20 mm d'épaisseur assure la résistance à la corrosion). Ce conteneur de dimensions plus grandes (diamètre d'environ 2 100 mm) et de masse plus importante (jusqu'à 75 tonnes suivant les modèles) que ceux étudiés par l'Andra pourrait recevoir un grand nombre d'assemblages combustibles (une vingtaine).

4.3.3 Description, performance

Cette section décrit plus en détail les paramètres de conception de la solution retenue, pour les combustibles de types CU1 et CU2. Elle en justifie le dimensionnement, au regard de la performance de durabilité attendue, et elle montre la compatibilité de l'objet avec les procédés de manutention.

Pour les conteneurs de stockage permettant d'accueillir les combustibles de type CU3, on se reportera à la section 4.2.3 et plus particulièrement aux éléments concernant les colis types C0.3. Les conteneurs de stockage sont en effet similaires en diamètre extérieur et en épaisseur d'acier, avec une longueur adaptée à celles des différents étuis contenant les assemblages.

4.3.3.1 Description

Deux familles de colis de stockage, aux dimensions standardisées, permettent de couvrir l'ensemble des combustibles usés de type CU1 et CU2 qui sont présentés dans la section 3.

● Le colis de stockage de grand diamètre (4 assemblages)

Ce colis d'un diamètre standard de 1 255 mm, dont la longueur varie entre 4 500 à 5 400 mm et la masse entre 35 à 43 tonnes suivant la configuration (assemblage court ou long⁴⁹, assemblages nus ou en étuis) est constitué de deux composants principaux : un corps doté d'un insert et un couvercle, ainsi qu'un composant intermédiaire appelé tape de fermeture.

Corps du conteneur

Le corps du colis de stockage de grand diamètre est constitué d'une virole cylindrique en acier non allié (P235) d'épaisseur utile de 110 mm et d'un fond de même épaisseur et de même matériau pour répondre au besoin d'étanchéité pendant une durée de 10 000 ans. À l'épaisseur utile du fond s'ajoute une épaisseur de 20 mm pour servir de talon lors du soudage par faisceau d'électrons.

Dans le corps est coulé (voir infra § 4.3.4) un insert en fonte doté de quatre logements destinés à recevoir chacun un assemblage combustible.

Les logements de l'insert illustrés par les Figure 4.3.3 et Figure 4.3.4 ont une géométrie adaptée aux composants qu'elles doivent accueillir, dans un souci de limitation des vides résiduels dans le colis de stockage :

- les assemblages nus sont placés dans des logements de section carrée ;
- les assemblages en étui individuel sont placés dans des logements de section cylindrique.

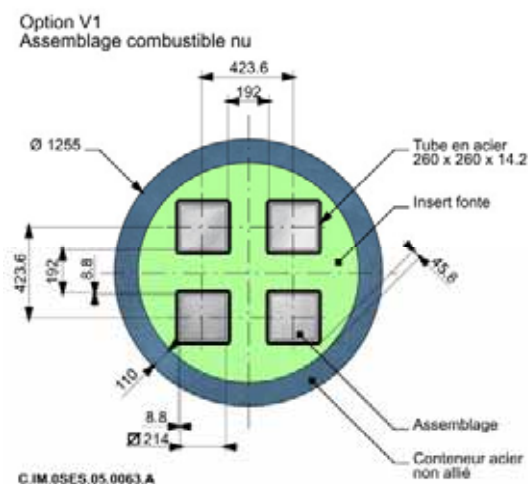


Figure 4.3.3 Logements carrés pour quatre combustibles usés nus

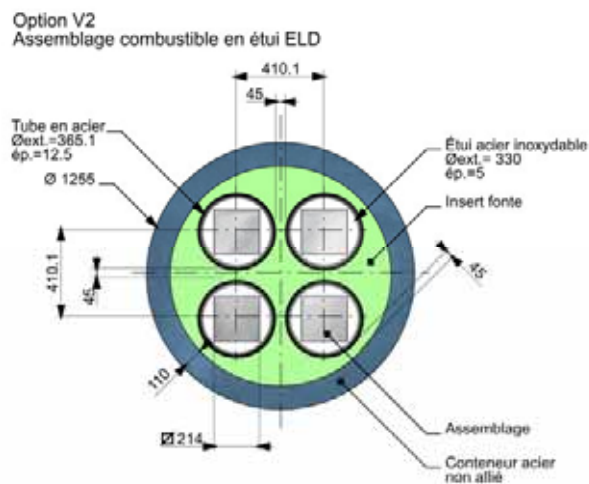


Figure 4.3.4 Logements cylindriques pour quatre combustibles usés en étuis individuels

L'épaisseur minimale de l'insert, entre les logements et la virole est définie en tenant compte des limites du procédé de fabrication mis en œuvre (fonderie). Elle est évaluée à environ 40 mm. Cette valeur retenue pour les deux variantes (logements carrés et logements circulaires) est suffisante pour assurer la tenue mécanique de l'insert lors de sa mise en charge (voir ci-dessous).

Cette épaisseur minimale s'applique aussi à la distance ménagée entre les logements.

⁴⁹ Les assemblages courts sont issus des réacteurs EDF de 900 MWe, les assemblages longs des réacteurs EDF de 1300/1450 MWe (cf. § 3.2.3.1)

Par souci de standardisation, le diamètre extérieur de la variante pour assemblages nus (logements carrés) a été pris identique à celui de l'autre variante. Les logements carrés ont ainsi été éloignés les uns des autres, ce qui favorise la sûreté-criticité du colis.

La tpe intermédiaire de fermeture

La tpe de fermeture est constituée d'un disque de 10 mm d'épaisseur (réalisé dans la même nuance d'acier que la virole) posé sur le haut de l'insert et directement soudé sur la partie interne de la virole en acier (au-dessus des logements ménagés dans l'insert). Elle permet de limiter le volume du vide à créer lors de l'opération de soudage par faisceau d'électrons⁵⁰. On notera qu'elle limite aussi les risques de contamination des installations de surface et en particulier de la cellule de soudage lors de la fermeture définitive du conteneur.

Le couvercle

Le couvercle dont le détail est illustré par la Figure 4.3.5 est réalisé dans la même nuance d'acier que l'enveloppe, l'épaisseur totale est d'environ 280 mm. Cette épaisseur prend en compte la résistance à la corrosion, la formation d'un talon nécessaire lors du soudage par faisceau d'électrons et une interface de manutention analogue à celle du couvercle du colis de déchets C, mais de dimensions adaptées à la masse du colis.

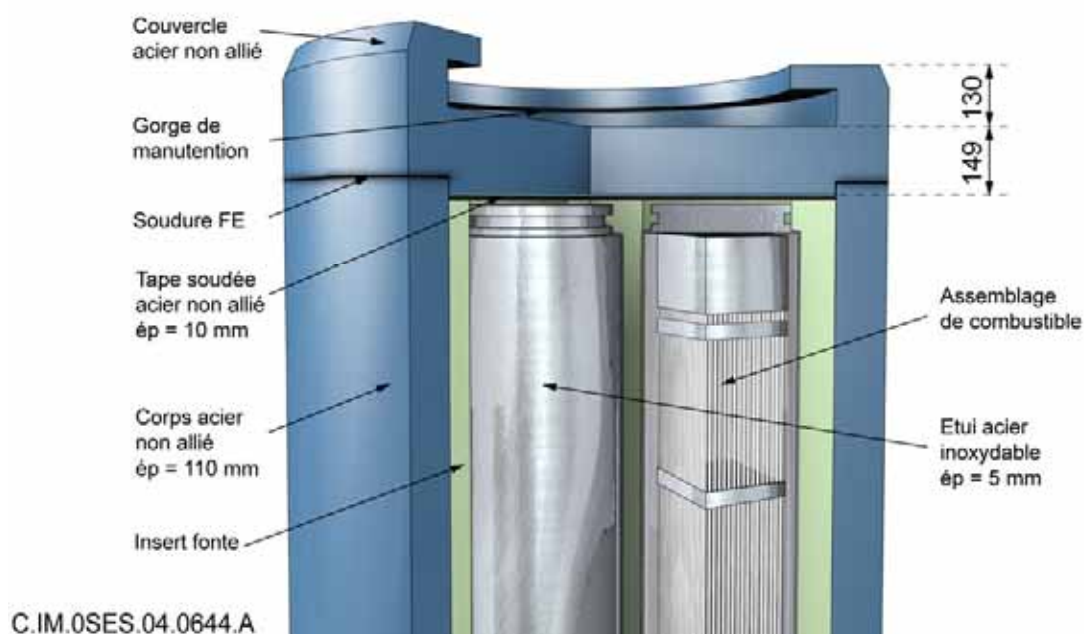


Figure 4.3.5 Détail du conteneur et de son couvercle (conteneur avec étui)

● Le colis de stockage de petit diamètre (1 seul assemblage)

Ce colis d'un diamètre hors tout standard de 620 mm, dont la longueur varie entre 4 500 à 5 400 mm et la masse entre 8 à 10 tonnes suivant la configuration (assemblage court ou long, assemblage nu ou en étui) est constitué des mêmes composants : un corps (sans insert) et un couvercle, et la tpe de fermeture.

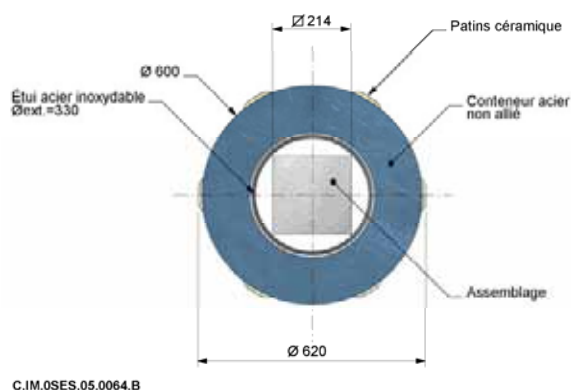
Ce colis est comparable par son diamètre au colis de stockage des déchets vitrifiés ; il est en revanche environ 3 fois plus long et 4 fois plus lourd. Au regard de son diamètre, le processus envisagé pour sa

⁵⁰ On évite aussi de créer du vide au niveau des assemblages, ce qui serait défavorable pour l'évacuation de la chaleur

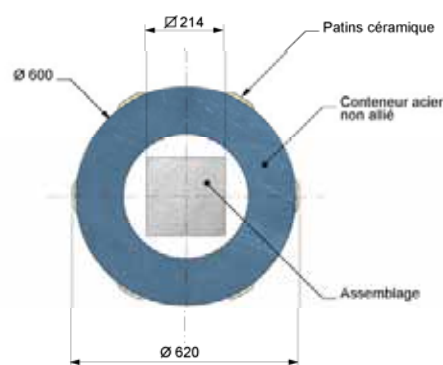
mise en place dans une alvéole de stockage est celui qui a été choisi pour les colis C (glissement sur le chemisage de l'alvéole par poussée, l'adoption des patins céramiques).

Le corps du colis de stockage de petit diamètre pour les deux variantes (assemblage nu et en étui individuel) est constitué d'une simple virole cylindrique en acier non allié (P235) d'épaisseur utile de 120 mm comme illustré sur les Figure 4.3.6 et Figure 4.3.7 et d'un fond rapporté soudé d'épaisseur 150 mm de même matériau. L'épaisseur utile est légèrement supérieure à celle de colis de grand diamètre car elle doit non seulement assurer l'étanchéité sur une durée de 10 000 ans (épaisseur de corrosion) mais également assurer la tenue mécanique du conteneur (voir ci-dessous). À l'épaisseur utile du fond s'ajoute une épaisseur de 20 mm pour servir de talon lors du soudage par faisceau d'électrons.

Assemblage en étui ELD



Assemblage nu



à mettre à jour

Figure 4.3.6 Logement pour assemblage en étui

Figure 4.3.7 Logement pour assemblage nu

Comme pour le conteneur de grand diamètre, une tôle assure la fermeture du logement dans lequel est disposé l'assemblage. C'est également un disque soudé de 10 mm d'épaisseur.

● Le couvercle

Le couvercle a une épaisseur totale d'environ 265 mm, qui permet d'assurer les mêmes fonctions que pour le conteneur de grand diamètre ainsi que la résistance mécanique.

4.3.3.2 Performances

Cette section rend compte des études qui ont été menées pour justifier le dimensionnement des conteneurs au regard des objectifs de durabilité (étanchéité, résistance mécanique) et de sûreté-criticité.

● Épaisseur d'acier et durée de vie

Comme dans le cas des déchets C, la durée de la phase thermique, c'est-à-dire la durée nécessaire pour que la température au niveau du colis devienne inférieure à 50 °C environ dépend de trois paramètres corrélés : (i) la température maximale retenue dans le stockage⁵¹, (ii) l'âge du combustible à la mise en stockage, (iii) l'architecture de la zone de stockage.

Pour une durée préalable d'entreposage avant stockage respectivement de 60 ans et 90 ans pour les combustibles de types CU1 et CU2, le dimensionnement thermique du stockage présenté à la section 5.3 conduit à une durée maximale de la phase thermique de quelques millénaires [10]. L'évolution de la température des colis dans le temps est présentée à la Figure 4.3.8.

⁵¹ Pour mémoire : 100 °C à la surface du conteneur de stockage et 90 °C au contact de la barrière ouvragée à base d'argile gonflante, voir chapitre 5.

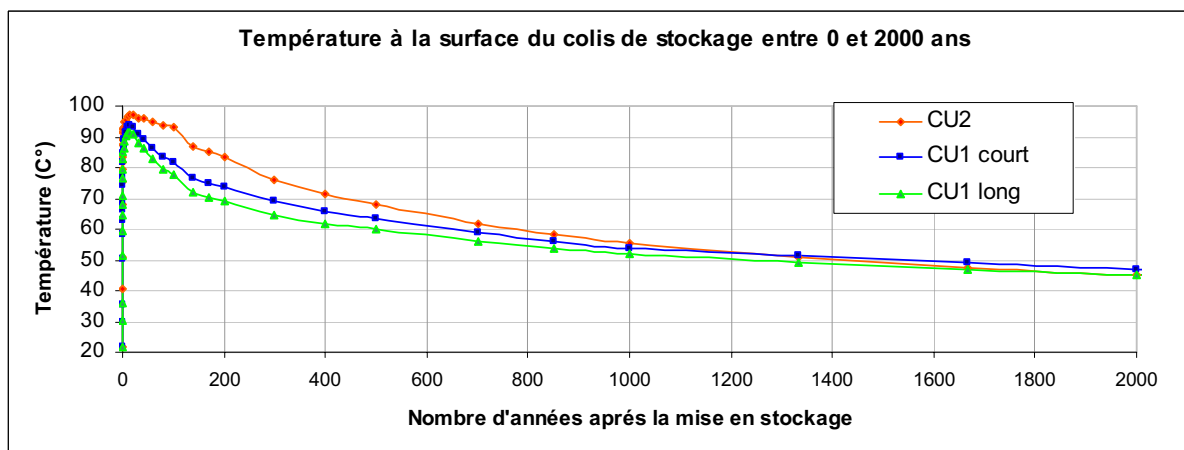


Figure 4.3.8 Evolution avec le temps de la température des colis de combustibles usés

L'épaisseur d'acier pour résister à la corrosion a été déterminée avec les mêmes modèles que pour le surconteneur de déchets C, en adoptant aussi une approche pénalisante (voir section 4.2.3.2). À l'horizon de 10 000 ans l'épaisseur affectée par la corrosion généralisée est estimée à 90 mm.

Dans le cas du conteneur de stockage de grand diamètre, l'épaisseur de la virole, de 110 mm est enveloppe de cette épaisseur de corrosion généralisée. L'épaisseur résiduelle de 20 mm alliée à la présence de l'insert garantit l'étanchéité de la virole soumise aux sollicitations mécaniques à cette date (voir infra).

Dans le cas du conteneur de stockage de petit diamètre, l'épaisseur utile d'acier de 120 mm résulte, de manière analogue aux conteneurs de déchets C, de la somme des deux termes suivants :

- une épaisseur de 30 mm assure la résistance de l'objet vis-à-vis des contraintes mécaniques qui s'exerceront à cette échelle de temps ;
- une surépaisseur de 90 mm correspondant à l'évaluation de la perte de substance par corrosion généralisée.

● Dimensionnement mécanique

Sur le long terme, on considère que les conteneurs de combustibles usés seront progressivement mis en charge après perte d'intégrité du chemisage et convergence de l'argilite. On a retenu pour le dimensionnement une valeur de pression supérieure de 50 % à celle retenue pour les surconteneurs de déchets C. Cette marge permet de se prémunir des effets associés à la plus grande durée d'étanchéité recherchée pour les conteneurs de combustibles usés. Cela concerne les contraintes thermomécaniques, potentiellement supérieures du fait de la décroissance radioactive plus lente (actinides), ainsi que la prise en compte de l'anisotropie des contraintes géostatiques.

Les conteneurs CU1 et CU2 sont donc mécaniquement dimensionnés pour prendre en compte une pression de 18 MPa appliquée uniformément sur les parois de l'enveloppe [13].

Dans le cas du conteneur de grand diamètre, la virole est en appui sur l'insert massif. Les calculs effectués dans le cadre des deux variantes (logements de section carrée ou circulaire selon que les assemblages sont placés nus ou en étui) montrent que les pressions exercées par la virole déformée induisent sur l'insert des contraintes très inférieures à la limite élastique de la fonte.

La limitation du jeu entre l'insert et la virole, d'ordre millimétrique, permet à cette dernière de rester dans le domaine élastique, ce qui favorise son comportement vis-à-vis de la corrosion.

Dans le cas du conteneur de petit diamètre, l'épaisseur affectée à la teneur mécanique est suffisante pour que le matériau de la virole demeure dans un domaine élastique.

- **Sûreté-criticité [55]**

Les calculs de criticité [55] ont montré le caractère sous - critique des colis quelles que soient les conditions de modération dans le colis et de réflexion neutronique autour du colis, en prenant en compte un taux de combustion des assemblages combustibles (crédit « burn-up »⁵²).

La solution à quatre assemblages par conteneur permet de couvrir environ 98 % de l'inventaire quantitatif des combustibles usés UOX pris en compte dans les études (il s'agit de la part estimée de combustibles présentant un taux de combustion supérieur ou égal au taux considéré pour l'évaluation de la criticité). Les assemblages combustibles dont le taux de combustion est trop faible pour permettre une démonstration de sous-criticité satisfaisante dans le colis à quatre assemblages peuvent être conditionnés de manière sûre dans le colis de petit diamètre à un assemblage.

L'évaluation du caractère sous - critique de l'ensemble de ces colis prend en compte des situations traduisant l'évolution à long terme des assemblages combustibles, du conteneur (évolution géométrique des logements suite à une corrosion progressive de l'insert) et de son environnement.

4.3.3.3 **Compatibilité avec les moyens de manutention**

De façon analogue au colis de stockage de déchets C, trois configurations du cycle de manutention du conteneur ont été prises en compte dans la conception et le dimensionnement. La première correspond à la manutention verticale du colis de stockage lors des opérations de conteneurage et d'entreposage temporaire préalablement au transfert vers les installations souterraines. La deuxième correspond à la mise en alvéole de stockage. Enfin, la troisième fait référence à un retrait éventuel du colis, en tenant compte par précaution, d'une corrosion de ce dernier.

- **Prise en compte des opérations de manutention verticale dans les installations de surface**

Les dimensions de la gorge de manutention, définies pour la manutention en alvéole (voir infra), sont largement suffisantes pour résister aux différentes sollicitations liées aux opérations de manutention verticale dans les installations de surface.

En ce qui concerne la tenue à la chute, des calculs aux éléments finis ont été effectués pour des chutes verticales sur une surface infiniment rigide, afin de déterminer la hauteur de chute acceptable, caractérisée par des déformations plastiques inférieures à 22 %. Ces calculs montrent qu'en dessous une hauteur de 5,90 m pour l'option « sans étui » et de 6,40 m pour l'option « avec étui » il n'y a pas de rupture de confinement. Le couvercle n'est pas endommagé et conserve sa fonction de préhension. Les déformations sur les logements des assemblages combustibles sont localisées et ne conduisent pas à des déformations plastiques susceptibles d'endommager les assemblages combustibles et d'empêcher leur retrait du conteneur. Ces hauteurs sont très largement supérieures aux hauteurs de survol envisagées dans les installations (3 mètres environ).

- **Prise en compte des opérations de mise en alvéole de stockage**

La masse et le diamètre du colis de grand diamètre (CU1) ont conduit à privilégier le principe de transfert du colis par coussin d'air comme illustré par la Figure 4.3.9 (cf. chapitre 9).

⁵² Le taux de combustion considéré est de 40 GWj/t pour un assemblage enrichi initialement à 4,5 %

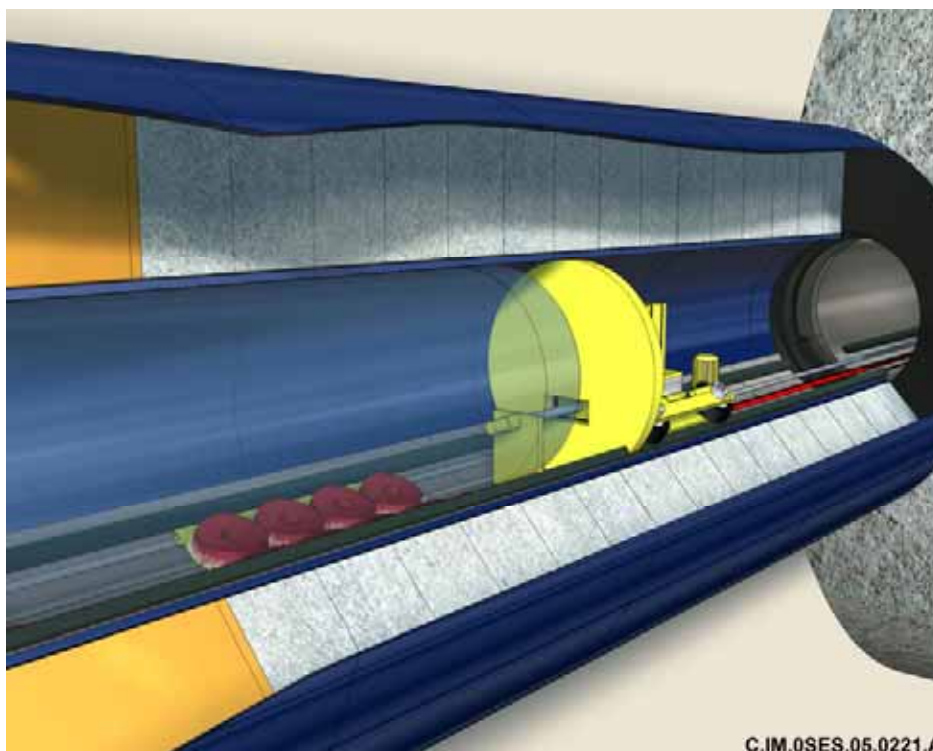


Figure 4.3.9 Mise en alvéole d'un colis de grand diamètre par coussin d'air

Ce procédé ne nécessite pas de dispositions techniques particulières au niveau du colis de stockage.

En revanche, pour le colis de stockage de plus petit diamètre (CU2, CU3), le principe du transfert dans une alvéole de stockage retenu est similaire à celui des colis de déchets C (dont le diamètre est proche), à savoir le glissement du colis dans le chemisage de l'alvéole à l'aide d'un robot pousseur.

De façon analogue au colis C, le glissement s'effectue par frottement des patins céramiques sur l'intrados du chemisage métallique.

- **Prise en compte d'une opération éventuelle de retrait**

De même que pour les colis de déchets C, on a déterminé un effort maximal applicable sur la gorge de manutention pour le retrait du colis de l'alvéole de stockage, en tenant compte d'une épaisseur de corrosion (2 mm). Le calcul donne un effort maximal applicable, correspondant à la limite élastique d'environ 800 kN pour le colis de grand diamètre et 500 kN pour le colis de petit diamètre. L'atteinte de la contrainte à la rupture correspond à un effort de traction deux fois supérieur.

4.3.4 Technique de fabrication du colis de stockage

Cette section expose les techniques de fabrication des colis de stockage de combustibles usés de types CU1 et CU2⁵³. Ces techniques ont été testées à l'échelle 1 dans le cadre de la réalisation de démonstrateurs⁵⁴. Ceux-ci correspondent au colis de stockage à quatre assemblages de type UOX 1 300 MWe dans ses deux variantes de gestion (assemblages nus et assemblages en étuis) telles que présentées par la Figure 4.3.10.

Comme pour les colis C, la fabrication s'effectuerait en deux phases. La première est consacrée à la fabrication en usine des composants du conteneur. La seconde phase comprend la mise en place dans le conteneur, des assemblages combustibles reçus nus ou en étui individuel, le soudage de la tôle à l'intérieur du corps et la fermeture du colis de stockage par soudage de son couvercle par faisceau

⁵³ Pour les combustibles de types CU3, on se reportera à la section 4.2.4.

⁵⁴ Ce programme a été réalisé en 2004 et 2005 en collaboration avec le CEA et EDF.

d'électrons. Cette seconde phase doit être réalisée dans une succession de cellules blindées, pour se protéger de l'exposition aux rayonnements.

4.3.4.1 Fabrication du conteneur et de son couvercle en usine



Figure 4.3.10 Les deux versions de conteneur de grand diamètre à logements cylindriques et carrés

Pour mémoire, les composants à fabriquer sont la virole en acier non allié (P235) d'épaisseur 110 mm, l'insert doté de quatre logements (cylindriques ou carrés), le fond, le couvercle et la tôle intermédiaire. Pour le conteneur de petit diamètre, il s'agit d'une virole en acier non allié (P235) d'épaisseur utile 120 mm, du fond, du couvercle et de la tôle intermédiaire.

Les diverses techniques analysées (cf. section 4.2) pour la fabrication du corps du surconteneur de déchets C ont également été envisagées pour la réalisation du corps du conteneur de stockage de combustibles usés. Comme pour la fabrication du corps du surconteneur C, deux techniques ont été identifiées comme particulièrement adaptées : (i) le forgeage de la virole et le soudage d'un fond rapporté (ii) le perçage-étirage permettant d'obtenir un corps en une seule pièce avec fond intégré.

À ce stade, au vu des grandes dimensions du colis et pour faciliter la réalisation de l'insert, on a privilégié pour les démonstrateurs la technique avec fond rapporté soudé sur une virole obtenue par forgeage d'un bloc d'acier.

Le forgeage de la virole est illustré, à la Figure 4.3.11, par des photographies prises lors de la fabrication des démonstrateurs.



Figure 4.3.11 Etapes de la fabrication de la virole en acier non allié

De gauche à droite et de haut en bas, le lingot de taille adaptée est transformé en ébauche creuse ; ensuite l'ébauche est placée dans un four pour être portée à une température de transformation puis positionnée sous une presse qui procède aux opérations de forgeage ; enfin le produit fini est usiné aux cotes finales.

4.3.4.2 Fabrication de l'insert pour les colis de grand diamètre

La nuance de la fonte est choisie pour faciliter la mise en œuvre de celle-ci. L'exigence principale concerne la limitation du retrait de la fonte lors du refroidissement après la coulée, afin de minimiser le jeu entre la virole en acier et l'insert (pour les performances mécaniques de l'ensemble)⁵⁵.

La coulée directe de la fonte dans l'enveloppe en acier a été choisie parce qu'elle permet plus facilement de minimiser ce jeu.

Les premières étapes de la réalisation de l'insert en fonte consistent en la réalisation d'un ensemble de quatre tubes (Figure 4.3.12).



Figure 4.3.12 Préparation pour la coulée de l'insert

Les tubes sont assemblés entre eux par l'intermédiaire d'entretoises soudées ; l'ensemble est ensuite descendu verticalement dans un puits de coulée, puis chaque tube est rempli de sable.

Après le positionnement de la virole forgée autour des quatre tubes, un bassin de coulée est disposé en tête de la virole ; sa fonction est de répartir la fonte en fusion à l'intérieur de la virole.

Les opérations de coulée sont illustrées par la Figure 4.3.13.

⁵⁵ La fonte retenue est de type fonte à graphite lamellaire (GJL150) (« G » pour pièce moulée, « J » pour fonte, « L » pour lamellaire « structure du graphite » et 150 pour la résistance en « MPa ») dont les teneurs en carbone et silicium tendent à favoriser l'expansion graphitique pour limiter le jeu à l'interface acier/fonte.



Figure 4.3.13 Coulée de l'insert

La fonte en fusion est acheminée dans une poche de coulée qui par basculement la verse dans le bassin de coulée.

Après refroidissement et usinage des extrémités du corps du conteneur, un contrôle dimensionnel permet de s'assurer que les logements ménagés à l'intérieur de l'insert sont conformes d'un point de vue géométrique pour recevoir des assemblages, comme cela est illustré sur les photographies de la Figure 4.3.14 pour les démonstrateurs.



Figure 4.3.14 Contrôles dimensionnels

À gauche, un gabarit aux dimensions de l'assemblage a permis de vérifier la section de passage de chaque logement sur toute sa longueur ; d'autres contrôles dimensionnels ont été réalisés (à droite). Des contrôles par ultrasons ont permis de confirmer le faible jeu entre l'insert et la virole en acier.

4.3.4.3 Soudage du fond et contrôles non destructifs associés

Le soudage du fond sur la virole et les contrôles associés peuvent s'effectuer de manière similaire au soudage du couvercle (faisceau d'électrons).

4.3.4.4 Assemblage et fermeture du colis de stockage

La suite de la fabrication du colis de stockage s'effectue en cellule blindée.

La première opération est le chargement des assemblages nus ou en étui dans les logements du conteneur. Les jeux fonctionnels permettent d'effectuer ce chargement verticalement, de manière simple.

La tôle de fermeture peut ensuite être posée sur le dessus de l'insert, le conteneur est mis en rotation et le soudage de la tôle est effectué pour un procédé de type MIG à l'aide d'un robot de soudage. Le couvercle est posé sur le corps du conteneur, puis l'ensemble est introduit partiellement dans une

enceinte dans laquelle le vide sera effectué, opération nécessaire au soudage par faisceau d'électrons. Le conteneur est alors mis en rotation et le soudage orbital du couvercle effectué.

Les procédés de contrôle sont analogues à ceux utilisés pour le colis de stockage de déchets C (voir section 4.2).

5

Les modules de stockage

5.1	Les modules de stockage de déchets B	160
5.2	Les modules de stockage de déchets C	190
5.3	Les modules de stockage de combustibles usés	232

L'objet du présent chapitre est d'exposer la conception des modules de stockage au regard des fonctions qui leur sont allouées et d'en justifier le réalisme en termes de construction, de performances, de surveillance, de réversibilité et de fermeture. On rappelle qu'un module de stockage est constitué d'une ou plusieurs alvéoles de stockage et des éléments de galerie permettant l'accès à ces dernières et que le terme « alvéole » de stockage désigne un ouvrage élémentaire, dans lequel sont placés les colis de stockage.

Ce chapitre expose tout d'abord les fonctions à assurer et les principes de conception envisagés pour chaque catégorie de déchets. À cet égard il montre comment la conception prend en compte les fonctions de sûreté à long terme, notamment la protection des colis par un environnement physique et chimique favorable, l'immobilisation des radionucléides et éléments toxiques qu'ils contiennent et la maîtrise des perturbations induites dans les argilites par la création des ouvrages. Il expose également en quoi des dispositions de conception particulières permettent de favoriser une gestion réversible de ces modules.

Une thématique particulière porte sur le choix des matériaux, de leur durabilité et de leur comportement à plus long terme. Dans la continuité des options de conception retenues pour les colis de stockage, le matériau privilégié pour les déchets B est le béton. Ce matériau est adapté à la réalisation d'ouvrages de grandes dimensions ; il peut de surcroît apporter un complément de rétention pour certains radionucléides. En revanche le béton n'a pas été retenu dans les alvéoles de stockage de déchets C (il en est de même pour le cas de combustibles usés). Il est préféré des matériaux métalliques dont le comportement en température est mieux maîtrisé sur la durée.

Ce chapitre fournit ensuite une description détaillée des ouvrages ainsi qu'une justification de leur dimensionnement. Il aborde la stabilité mécanique des ouvrages creusés dans les argilites, et la maîtrise des perturbations mécaniques qu'ils y induisent. Le dimensionnement est fondé sur une profondeur de 500 m. Un dimensionnement pour une profondeur supérieure (630 m au maximum sur la zone de transposition), ne soulèverait pas de difficultés particulières. Ses conséquences sont examinées dans l'analyse de sûreté [56]. Le dimensionnement des modules renvoie aussi à l'objectif de compacité du stockage. Cet objectif consiste à rechercher une configuration pertinente au regard du volume de déchets et du volume correspondant à excaver dans les argilites. Les différentes techniques de construction envisageables sont exposées et les raisons ayant conduit l'Andra à privilégier l'une d'entre elles sont justifiées.

Enfin, ce chapitre présente la méthode de fermeture des modules, qui concilie (i) des objectifs de faible perméabilité (ii) la capacité de réaliser cette opération aussi simplement que possible (iii) le maintien de l'option d'un retour en arrière.

5.1 Les modules de stockage de déchets B

Cette section présente les principes généraux retenus pour la conception des modules de stockage de déchets B et en expose les raisons. Elle évoque à titre de comparaison les concepts étudiés à l'étranger.

La description d'une alvéole, de sa galerie d'accès et de son équipement, qui constituent un module de stockage, est ensuite présentée ainsi que les résultats des calculs de dimensionnement mécanique, thermique et thermomécanique de l'alvéole. Il est notamment montré comment les fonctions de sûreté à long terme ainsi que la mise en place des colis et la réversibilité sont prises en compte dans le choix des matériaux et la conception. La logique d'agencement des différentes alvéoles entre elles en fonction des types de déchets est justifiée. Enfin, cette section fournit une description des techniques de construction et de fermeture.

5.1.1 Exposé des questions principales

Les éléments qui sous-tendent la conception des modules de stockage pour déchets B sont essentiellement liés au nombre de colis primaires de déchets, au caractère irradiant de la plupart d'entre eux et aux caractéristiques physico-chimiques des déchets et de leurs conditionnements.

À ces éléments s'ajoutent des exigences de sûreté opérationnelles et de réversibilité.

5.1.1.1 Recherche de compacité du stockage

Une réponse simple en termes de regroupement et de standardisation des colis de stockage a été apportée à la diversité des colis primaires, en regroupant les colis primaires dans des colis de stockage en béton de forme parallélépipédique⁵⁶, comme décrit au chapitre 4. Cependant le volume total des colis de déchets B implique de concevoir des modules de stockage compacts pour limiter le volume de roche qu'il est nécessaire d'excaver pour stocker l'ensemble de l'inventaire.

Cette recherche de compacité doit néanmoins rester compatible avec la maîtrise de l'endommagement de la roche, de la température et de l'état sous-critique de certains colis.

5.1.1.2 Sûreté en phase d'exploitation

La conception des alvéoles de stockage de déchets B doit permettre :

- d'assurer la stabilité mécanique des ouvrages pendant leur exploitation ;
- de protéger le personnel du rayonnement ;
- de gérer les gaz susceptibles d'être produits par certains colis.

● Assurer la stabilité mécanique des ouvrages

Lorsque débutent les opérations de mise en stockage des colis, l'alvéole devient inaccessible du fait du caractère irradiant des colis. Toute opération de maintenance du revêtement nécessiterait donc de retirer provisoirement les colis stockés. Pour simplifier la gestion du stockage, on a retenu de dimensionner le revêtement pour assurer durablement la stabilité mécanique de l'alvéole, pendant la mise en place des colis et au-delà, dans l'optique de la réversibilité. Une durabilité pluriséculaire est considérée.

● Protéger le personnel du rayonnement

Lors des opérations de mise en place des colis, de maintenance et de surveillance, le personnel d'exploitation doit être protégé de l'irradiation directe engendrée par les colis, mais aussi de celle susceptible d'être engendrée par les gaz radioactifs libérés en très faible quantité par certains d'entre eux.

● Évacuer les gaz

La majorité des déchets B produit de l'hydrogène par radiolyse des matières qu'ils contiennent. En complément du besoin mentionné ci-dessus de protéger le personnel des gaz radioactifs, une attention particulière doit être portée à la maîtrise des risques associés à la présence d'hydrogène dans l'air, à l'intérieur des alvéoles et des galeries.

5.1.1.3 Sûreté à long terme

Vis-à-vis des fonctions de sûreté à long terme décrites à la section 2.1.2, la conception des alvéoles contribue à :

- préserver les propriétés favorables du milieu en limitant les perturbations induites par le stockage ;
- maîtriser la température ;
- maintenir un état sous-critique pour les colis B contenant des traces d'éléments fissiles ;
- maîtriser la circulation d'eau autour et au sein des modules et des alvéoles ;
- fractionner le stockage pour limiter l'impact radiologique éventuel dans certaines situations hypothétiques ;

⁵⁶ On rappelle que ces colis de stockage n'auront pas de rôle de protection biologique, dans un objectif de recherche de compacité

- protéger les colis primaires et de stockage d'altérations physico-chimiques susceptibles d'accélérer leur détérioration ;
- retenir certains radionucléides.

● **Limiter les perturbations des argilites**

Les perturbations des argilites induites par le stockage sont principalement des perturbations mécaniques. Le creusement des alvéoles engendre une perturbation des argilites autour des ouvrages. La conception de ces ouvrages doit avoir pour objectif de maîtriser l'extension de cette dernière, notamment d'en éviter toute propagation à court et surtout à long terme. Les perturbations d'origine mécanique sont des microfissures, voire des fractures, qui se créent en paroi d'excavation lors du creusement des alvéoles dans les argilites. Elles peuvent avoir un impact notable sur la perméabilité du milieu géologique en champ proche. Ces perturbations, localisées en paroi sur une épaisseur de l'ordre d'un demi rayon⁵⁷ après creusement [57], sont susceptibles de se propager à long terme, après rupture du revêtement (au bout d'un millier d'années environ). Cette propagation, induite par le comportement différé (de type visqueux) des argilites ne se produit que lorsque la déformation des argilites en paroi atteint une valeur seuil. Le moyen de maîtriser cette propagation consiste à limiter la déformation maximale possible de la roche.

Pour cela, il apparaît nécessaire de limiter le taux de vide au sein de l'alvéole (principalement entre les colis de stockage), en complément de la limitation du taux de vide au sein des colis de stockage. En outre, la zone de roche perturbée peut être limitée par un choix approprié de la méthode de creusement, de la géométrie des alvéoles de stockage et de leur orientation [57].

Pour mémoire, le stockage peut également perturber chimiquement la roche du fait de l'introduction d'air ou de matériaux exogènes. L'amplitude de ces perturbations, en particulier la perturbation alcaline, a été évaluée pour vérifier leur caractère limité [7] [58].

● **Maîtrise de la température**

Comme pour les colis de stockage, la limitation de la température au sein des alvéoles résulte :

- du besoin de maîtriser l'évolution des matériaux constitutifs du revêtement de l'alvéole ;
- du besoin de décrire le comportement des radionucléides dans le stockage.

Pour le béton, la maîtrise de la température revêt un aspect important. En effet, son évolution avec la température dépend conjointement du niveau de température et de la durée pendant laquelle s'exerce cet échauffement. L'étude des propriétés physiques et chimiques des matériaux cimentaires considérés fait apparaître principalement un seuil de température affectant les processus d'évolution chimique du matériau (carbonatation, hydrolyse). Tant que la température reste inférieure à ce seuil, les propriétés physiques et chimiques, en particulier la perméabilité, évoluent de manière réversible ou restent constantes. Au-delà de ce seuil, certains hydrates des pâtes de ciment sont instables : une modification minéralogique importante conduirait alors à une altération irréversible des propriétés physiques et mécaniques du béton. En outre, à ces températures, des incertitudes sur les propriétés chimiques existent [48].

La température et la durée d'échauffement doivent être limitées autant que possible. Une température maximale de 70 °C a été retenue.

Dans le cas particulier des alvéoles contenant les déchets de type B2 (bitumes), une limite de température beaucoup plus basse, à savoir 30 °C, a été retenue pour maintenir les propriétés rhéologiques de l'enrobé bitumineux.

Il convient de noter que les critères ci-dessus définissent un domaine compatible avec le domaine de validité des modélisations thermohydromécaniques actuelles, ainsi qu'avec les connaissances sur le comportement des radionucléides en termes de solubilité et de sorption.

⁵⁷ Zone microfissurée à 500 m de profondeur pour des excavations circulaires et orientées parallèlement à la contrainte horizontale majeure.

- **Rester sous critique pour les colis B contenant des traces d'éléments fissiles,**

Certains déchets B contiennent des traces de matière fissile. Le dimensionnement des alvéoles, en liaison avec celui des colis de stockage, doit garantir que l'ensemble des colis et des installations restent sous critiques non seulement dans la configuration géométrique initiale, mais aussi en tenant compte des phénomènes d'altération à long terme des matériaux pouvant conduire à des augmentations locales de concentration de matière fissile. Les paramètres de dimensionnement concernés sont essentiellement la densité de stockage (ou l'espacement entre colis) et l'agencement des colis.

- **Maîtriser la circulation d'eau autour et au sein des alvéoles**

La construction et l'exploitation d'ouvrages souterrains créent une perturbation du régime hydraulique naturel. La phase de resaturation des alvéoles B s'étend sur plusieurs dizaines de milliers d'années et au-delà [8]. Après le retour à un nouvel équilibre hydraulique, la maîtrise de la circulation d'eau vise à minimiser le flux d'eau susceptible de circuler dans l'alvéole et donc à limiter la vitesse de cette eau. En particulier, la conception tend à réduire les flux d'eau provenant des ouvrages d'accès. La géométrie de l'alvéole ainsi que son mode d'accès et de fermeture doivent permettre de minimiser ces flux.

- **Fractionner le stockage**

Le fractionnement du stockage en modules limite l'impact sur les personnes et l'environnement d'une éventuelle défaillance après fermeture du stockage.

- **Protéger les déchets vis-à-vis des agressions physico-chimiques**

La protection des déchets a pour but de limiter le relâchement des radionucléides. En pratique, cela consiste à limiter la corrosion des déchets B contenant des pièces activées en acier inoxydable ou en alliage de nickel, zirconium ou manganèse (à savoir les colis types B1, B4, B5, B6 et B7) et de limiter l'altération du bitume des colis type B2.

En présence d'eau (c'est-à-dire après fermeture de l'alvéole et resaturation), des conditions physico-chimiques de pH alcalin au sein de l'alvéole contribuent à limiter la corrosion anoxique des déchets métalliques.

Par ailleurs, pour limiter l'altération des enrobés bitumés, les conditions d'environnement recherchées conduisent à imposer dans les alvéoles contenant des colis type B2 un pH inférieur à 12,5, en complément de la limitation de température déjà mentionnée ci-dessus.

- **Contribuer à la rétention de certains radionucléides**

Les matériaux utilisés au sein de l'alvéole pour le revêtement peuvent aussi contribuer à immobiliser certains radionucléides dans le stockage, en complément de la roche par les conditions physico-chimiques qu'ils imposent dans l'alvéole⁵⁸.

5.1.1.4 **Prise en compte de la réversibilité**

La réversibilité est prise en compte dans la conception des ouvrages en privilégiant non seulement les facteurs favorables à une flexibilité de gestion du stockage, mais également ceux qui facilitent une opération éventuelle de retrait des colis. Ces facteurs sont principalement la durabilité des ouvrages et les jeux fonctionnels.

La durabilité des ouvrages garantit le maintien des jeux fonctionnels entre les colis et les parois de l'alvéole pendant une durée au moins séculaire. Elle contribue également à la durabilité des colis de stockage (déjà mentionnée au chapitre 4). Le maintien des jeux de manutention et de l'intégrité des

⁵⁸ Ainsi un pH alcalin favorise l'insolubilisation du nickel, de l'américium et du curium. Les ciments ont aussi une capacité de rétention du neptunium et du plutonium.

colis offre une grande souplesse de gestion de l'alvéole et rend en particulier une éventuelle opération de retrait des colis aussi simple que leur mise en place, tant que l'alvéole n'est pas scellée.

5.1.2 Principes de conception retenus pour l'alvéole

5.1.2.1 Plusieurs options envisagées et comparées

Les paramètres clés de la conception d'une alvéole de stockage de déchets B concernent la géométrie de l'alvéole, la logique d'agencement des colis à l'intérieur de l'alvéole et le mode de manutention des colis. En effet, l'alvéole de stockage est indissociable de la conception du colis de stockage et de son système de manutention.

● Géométrie de l'alvéole : tunnels de diamètre moyen à grand ou grandes cavités

La géométrie de l'alvéole résulte du besoin de compacité, de considérations géotechniques et des caractéristiques des colis.

Le besoin de compacité exprimé précédemment oriente la conception vers des ouvrages de grande capacité de stockage, donc de grandes dimensions. Le caractère non ou peu exothermique des déchets B permet le stockage côte à côte d'un grand nombre de colis confortant ainsi cette orientation vers des ouvrages de grande taille. La dimension maximale des diverses options qui ont été envisagées est de l'ordre d'une vingtaine de mètres avec une géométrie de type tunnel quasi circulaire (Figure 5.1.1) ou de type grande cavité ou silo (Figure 5.1.2).

Il convient toutefois de définir une dimension raisonnable au regard des contraintes de construction, de comportement mécanique et de préservation d'une garde d'argilite non perturbée au-dessus et au dessous des ouvrages.

La dimension d'alvéole finalement retenue de 10 à 12 m permet de concilier ces deux aspects.

● Manutention horizontale ou verticale

Le choix de manutentionner les colis verticalement ou horizontalement influe fortement sur la conception de l'alvéole.

Dans le cas d'une manutention verticale, un vide apical doit être ménagé sur toute la longueur de l'alvéole pour permettre l'évolution des engins de manutention (Figure 5.1.2 et Figure 5.1.4). Ce vide, qui ne peut pas être utilisé pour le stockage, réduit donc la compacité de ce dernier.

Dans le cas d'une manutention horizontale, il est possible de transporter les colis latéralement (Figure 5.1.1 et Figure 5.1.3). Cette configuration, qui permet d'utiliser la totalité de la section de l'alvéole pour le stockage, favorise la compacité du concept.

La recherche de compacité et le choix d'ouvrages excavés d'un diamètre de l'ordre de 10 à 12 m ont ainsi conduit à retenir un mode de manutention horizontale des colis.

● Agencement des colis de stockage en tubes guides ou empilés

En termes d'agencement des colis à l'intérieur de l'alvéole, deux grandes logiques ont été comparées.

La première consiste à stocker les colis dans des tubes guides. La mise en place des tubes dans l'alvéole et le remplissage des vides entre les tubes sont réalisés au moment de la construction. Plusieurs solutions de mise en place de ces tubes ont été envisagées : tubes métalliques avec béton coulé ou éléments préfabriqués en béton de section hexagonale de type « nid d'abeille » (Figure 5.1.1). Cette deuxième solution permet une réduction significative de l'espacement entre les tubes de stockage, donc une meilleure compacité. Toutefois, les éléments doivent être alignés les uns par rapport aux autres dans le sens longitudinal pour constituer les tubes en béton dans lesquels sont stockés les colis. Il est alors possible d'obtenir une bonne compacité de stockage en équipant ainsi une alvéole de 10 à 11 mètres de diamètre. Cependant, en configuration horizontale, la mise en place des colis dans les tubes guides nécessite des moyens de manutention relativement complexes dans la

galerie d'accès pour amener les colis à la hauteur des tubes (jusqu'à environ 9 m au-dessus du radier) et pour ensuite les mettre en place par poussage. Par ailleurs, ce mode de mise en place des colis peut conduire à limiter la longueur des alvéoles.

La deuxième logique consiste à empiler et juxtaposer des colis sans aucun matériau séparateur pour obtenir une compacité maximale. Pour ce faire, une chambre de stockage de forme parallélépipédique est aménagée dans l'alvéole excavée, lors de la réalisation du revêtement en béton. Les dimensions de cette chambre sont adaptées aux dimensions des colis de stockage (eux-mêmes parallélépipédiques) pour minimiser les vides entre colis et entre les colis et la paroi. Cet aménagement nécessite une bonne précision de l'engin de manutention lors de la mise en place des colis, qui est tout à fait accessible avec les moyens existants. Il conduit, en configuration horizontale, à une très bonne compacité du stockage. En outre, la minimisation des vides dans la chambre de stockage évite d'avoir à les combler lors de la fermeture de l'alvéole, ce qui est un élément favorable vis-à-vis du retrait éventuel des colis.

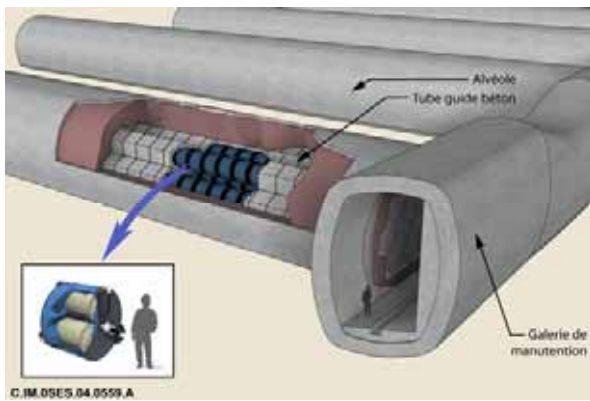


Figure 5.1.1 Tunnel avec tubes guides horizontaux

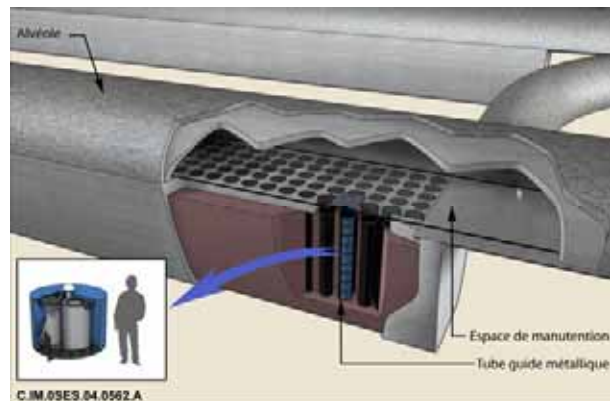


Figure 5.1.2 Cavité avec tubes guides verticaux

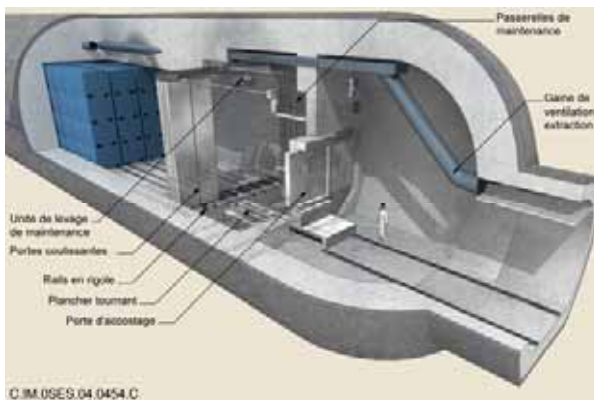


Figure 5.1.3 Tunnel pour des colis de stockage parallélépipédiques (manutention horizontale)

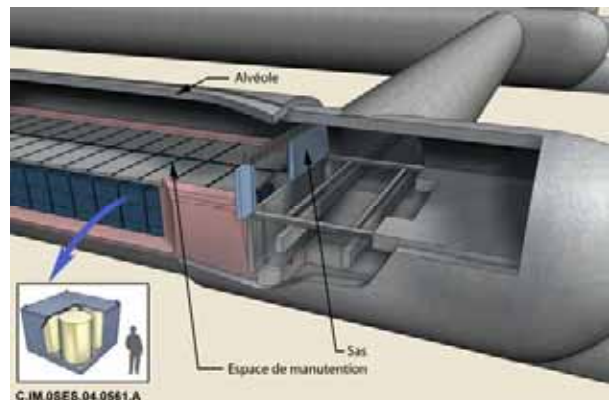


Figure 5.1.4 Tunnel pour des colis de stockage parallélépipédiques (manutention verticale)

- **Bilan**

En conclusion, le concept privilégié (Figure 5.1.3) et décrit ci-dessous correspond au concept de colis de stockage parallélépipédiques empilés dans une chambre parallélépipédique en manutention horizontale.

5.1.2.2 La solution retenue

- **Généralités**

L'alvéole de stockage retenue est un tunnel borgne subhorizontal, d'une longueur utile d'environ 250 m⁵⁹ et d'un diamètre excavé compris entre 10 et 12 m. Le revêtement de ce tunnel est en béton. Cette alvéole constitue une chambre irradiante dans laquelle les colis sont stockés par un engin de type chariot élévateur téléopéré. La tête de l'alvéole est équipée d'un sas de radioprotection permettant la protection du personnel lors de l'extraction d'un colis de stockage hors de sa hotte de protection. L'alvéole est ventilée pendant toute sa durée d'exploitation pour évacuer les gaz produits par les colis.

L'alvéole est reliée au réseau de galeries de liaison par une galerie d'accès de diamètre réduit. Cette galerie sera scellée au moment de la fermeture de l'alvéole. Ce concept est illustré par la Figure 5.1.5 qui présente l'alvéole en configuration d'exploitation et la Figure 5.1.6 qui présente l'alvéole en configuration scellée.

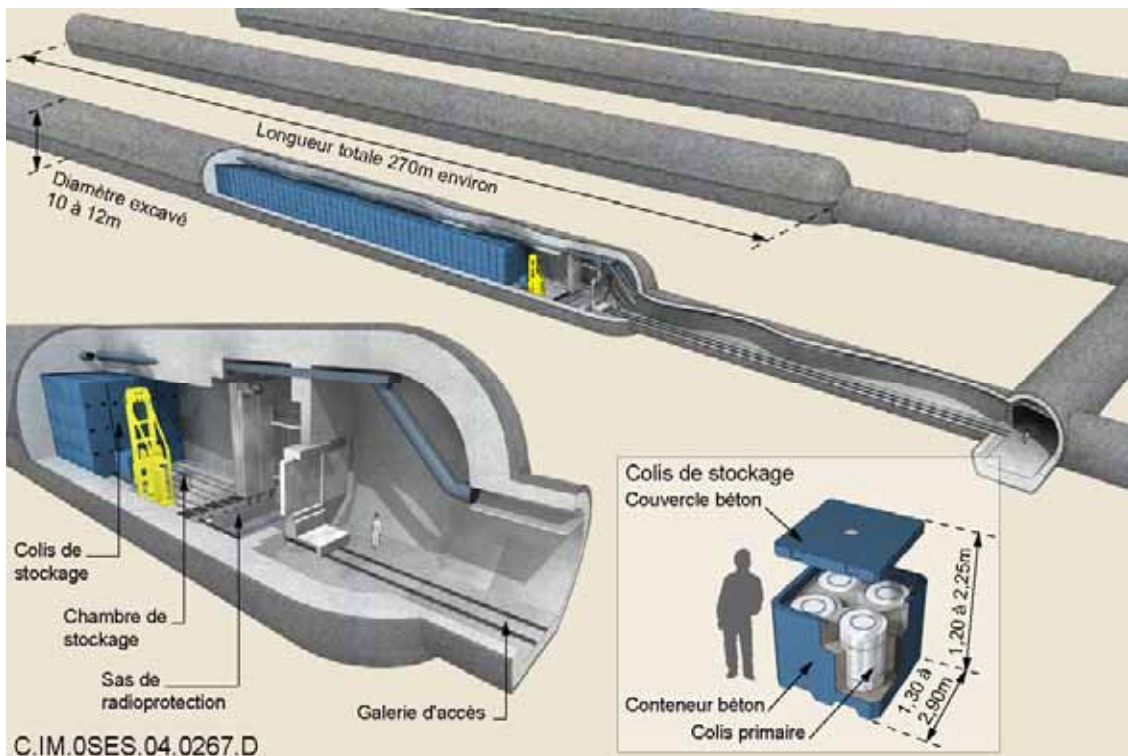


Figure 5.1.5 Alvéole de stockage de déchets B en configuration d'exploitation

⁵⁹ Cette longueur utile correspond à une longueur totale de l'ordre de 270 m, y compris la tête et le fond de l'alvéole

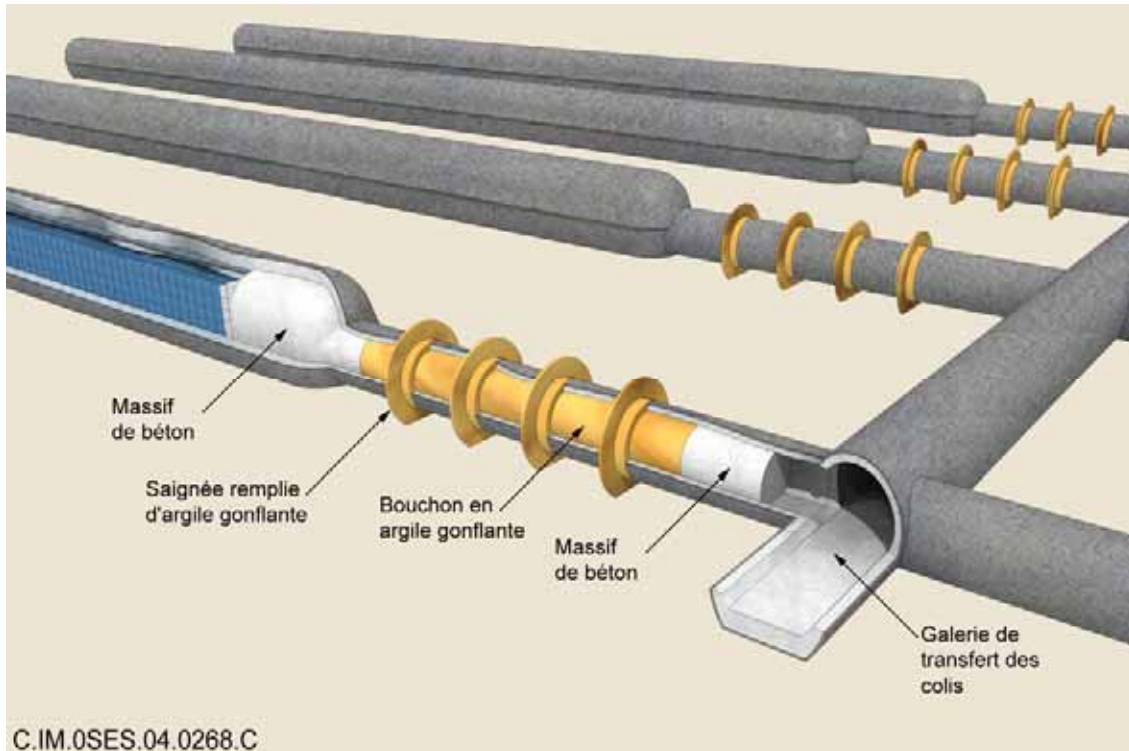


Figure 5.1.6 Alvéole de stockage de déchets B scellée

● La géométrie et l'orientation de l'alvéole

La définition du diamètre du corps de l'alvéole résulte d'un équilibre entre le besoin d'une compacité maximale et le souci de constructibilité de l'alvéole au regard du comportement mécanique de la formation géologique et des incertitudes résiduelles. Le premier besoin milite en faveur d'une alvéole aussi grande que possible cependant que le deuxième conduirait à adopter un ouvrage de petite dimension. Comme indiqué plus haut, un diamètre de 10 à 12 m a été considéré comme un compromis raisonnable. Cette dimension correspond aux dimensions fréquemment rencontrées pour des tunnels routiers ou ferroviaires sous forte couverture rocheuse et dotés d'une durée de vie séculaire, par exemple le tunnel de Chamoise creusé dans une roche similaire aux argilites [59].

On a retenu à ce stade des études une longueur utile d'alvéole de l'ordre de 250 m. Cette longueur apparaît comme un compromis raisonnable entre la compacité du stockage, la flexibilité et la progressivité de la gestion du stockage, l'adaptabilité des alvéoles à la grande diversité des colis, les contraintes de maintenance et l'inscription des alvéoles dans la couche d'argilite.

L'alvéole a une section pseudo circulaire et elle est orientée parallèlement à la contrainte horizontale majeure. Cette configuration crée, autour du corps de l'alvéole et de la galerie d'accès dans laquelle se situera le futur scellement, un état de contrainte quasi isotrope et minimise les perturbations mécaniques engendrées lors du creusement.

Le caractère borgne de l'alvéole permet de limiter la circulation d'eau au sein de l'alvéole dans des situations de défaut de scellement (scellement de l'alvéole ou autre scellement).

Les distances entre les alvéoles sont au moins égales à cinq diamètres excavés, pour minimiser les interférences mécaniques entre les alvéoles et assurer à long terme la stabilité d'ensemble de la zone. Il a été vérifié, en outre, que cette géométrie des alvéoles et de la zone de stockage était compatible avec le respect des critères de température (30 °C pour les colis type B2 et à 70 °C pour les autres colis), sans prendre en compte l'effet favorable de la ventilation.

● **La nature du revêtement de l'alvéole**

Le corps de l'alvéole est essentiellement caractérisé par un revêtement en béton. Le choix du béton répond au besoin de stabilité mécanique de l'ouvrage laissé sans maintenance pendant une durée a minima séculaire. En effet, le béton est un géomatériau, facile à mettre en œuvre, et stable pendant la durée considérée. Sa dégradation chimique (par hydrolyse et carbonatation) est lente en conditions de stockage [48]. Le béton de revêtement n'est pas armé, pour que sa durabilité ne soit pas tributaire de la corrosion de l'acier.

Par ailleurs, comme indiqué plus haut, le béton a un impact favorable vis-à-vis de l'immobilisation de certains radionucléides et vis-à-vis de la corrosion des déchets métalliques.

● **La forme du revêtement de l'alvéole**

Pour limiter les déformations mécaniques de la formation géologique à long terme, il est nécessaire de limiter autant que possible le taux de vide résiduel après mise en place des colis. Une solution classiquement adoptée pour limiter ce taux de vides consisterait à remblayer les vides résiduels de l'alvéole avec un matériau granulaire ou cimentaire après la mise en place des colis. Cette solution présente cependant un double inconvénient : elle nécessite une opération complémentaire rendue complexe par le caractère irradiant des colis et elle rend plus difficiles les conditions de retrait éventuel des colis, car ceux-ci seraient bloqués par le matériau de remplissage.

La solution adoptée prend en compte le besoin de limiter les vides résiduels et le besoin de maintenir un jeu fonctionnel pérenne pendant une durée a minima séculaire (pour permettre une gestion réversible du stockage). Le principe retenu consiste, au moment de la construction, à ajouter à l'anneau de revêtement⁶⁰ assurant la stabilité mécanique un volume de béton supplémentaire, de telle sorte que soit constituée une chambre de stockage de section rectangulaire et de dimension adaptée à la forme de l'empilement des colis. Les jeux décimétriques laissés entre les colis permettent ainsi de satisfaire aux deux conditions mentionnées ci-dessus. Ces jeux conduisent en effet à un taux de vide entre colis inférieur à 5 %, ramené à la section excavée [57].

● **Sas en tête d'alvéole et radioprotection**

Pour répondre au besoin de radioprotection du personnel, la tête de l'alvéole est équipée d'un sas séparant la galerie d'entrée du corps de l'alvéole.

● **Galerie d'accès et scellement de l'alvéole**

La galerie d'accès de l'alvéole, qui assure la liaison entre l'alvéole et l'infrastructure de liaison, est conçue pour accueillir le scellement permettant de fermer l'alvéole. Pour favoriser au mieux la performance du scellement, cette galerie a un diamètre utile réduit à 5 ou 6 m, suivant la taille des colis à stocker dans l'alvéole, et son soutènement et son revêtement sont conçus spécifiquement de manière à limiter les perturbations mécaniques au droit du scellement, comme pour les scellements en galeries de liaison. La longueur de cette galerie d'entrée (une cinquantaine de mètres) est déterminée par la place nécessaire à la constitution du scellement et de ses massifs d'appuis.

● **Agencement des alvéoles entre elles**

Pour améliorer la compacité du stockage et simplifier l'exploitation, le regroupement de certains colis types (en particulier ceux dont le nombre est faible), permet d'éviter la construction de plusieurs alvéoles de longueur réduite et ainsi de limiter l'emprise globale de la zone de stockage. Toutefois, pour éviter des interactions chimiques entre colis susceptibles d'altérer les propriétés de rétention dans et autour des alvéoles, les colis contenant des matières organiques sont stockés séparément des autres colis [37].

⁶⁰ De forme quasi-circulaire

- **Ventilation des alvéoles**

Le béton de remplissage comprend des conduits de ventilation longitudinaux afin de permettre la ventilation de l'alvéole pendant toute son exploitation et jusqu'à son scellement. Cette disposition répond au besoin de maîtrise de la gestion des gaz. Cette ventilation contribue également à diminuer la température dans les premières années du stockage des colis.

- **Bilan des besoins et des solutions retenues**

La contribution des différentes composantes de l'alvéole aux fonctions du stockage est synthétisée dans le Tableau 5.1.1. [7], [22].

Tableau 5.1.1 Fonctions et principaux composants de l'alvéole B (ou module)

Fonctions	Période	Revêtement Béton	Section des alvéoles	Scellement dans la galerie d'accès	Sas d'entrée des alvéoles
Transférer les colis jusqu'à leur emplacement de stockage	Exploitation		X		
Soutenir mécaniquement les ouvrages	Exploitation et observation	X	x		
Protéger les personnes contre l'irradiation	Exploitation et observation				X
Permettre de récupérer les colis de stockage	Exploitation et observation	X	X		
S'opposer à la circulation d'eau	Après fermeture			X	
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Après fermeture	X		x	
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Après fermeture			x	
Limiter les déformations mécaniques dans les argilites du Callovo-Oxfordien	Après fermeture	x	X		
Fractionner le stockage	Après fermeture			X	

Légende : X composant essentiel dans la réalisation d'une fonction
 x contribution d'un composant à une fonction

5.1.2.3 Les solutions adoptées à l'étranger

Plusieurs pays étudient des solutions de stockage souterrain pour des déchets similaires aux déchets français de catégorie B, dans des milieux à caractère argileux.

En Suisse, la Nagra⁶¹ étudie la faisabilité d'un stockage souterrain dans une argilite aux caractéristiques minéralogiques proches de celle du site de Bure, mais ayant des propriétés mécaniques plus résistantes. Le concept retenu est un tunnel dont les dimensions sont de l'ordre de 9 m de haut par 7 m de large. Les colis de stockage sont empilés dans ces tunnels sur 2 ou 3 niveaux. La Nagra n'a pas retenu de minimiser les vides entre les colis et l'alvéole de stockage et elle a privilégié un remplissage des vides par un mortier après mise en place des colis (Figure 5.1.7). L'alvéole est ensuite fermée par un bouchon en béton [44].

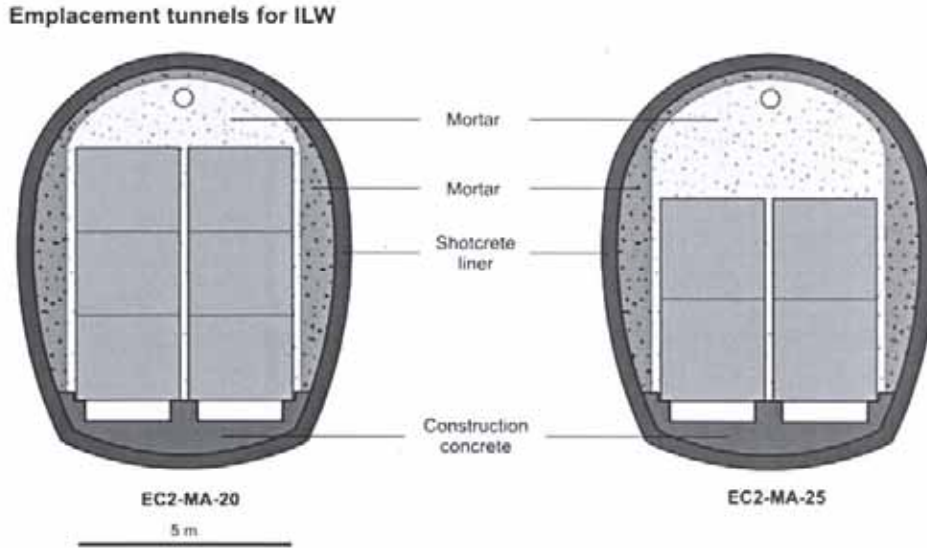


Figure 5.1.7 Schéma du concept retenu par la Nagra (Suisse)

En Belgique, le concept retenu par l'ONDRAF⁶² consiste à placer des « monolithes » (colis de stockage en béton regroupant plusieurs colis primaires) dans des galeries de diamètre ajusté au diamètre des monolithes, soit de 3 à 4,5 m (Figure 5.1.8). Ce faible diamètre excavé a pour but de s'adapter aux propriétés de la roche hôte de Boom, plus argileuse et beaucoup plus plastique que les argilites de Meuse/Haute-Marne. Les jeux de mise en place entre le monolithe et le revêtement de la galerie sont minimisés ; ils ne nécessitent pas leur comblement.

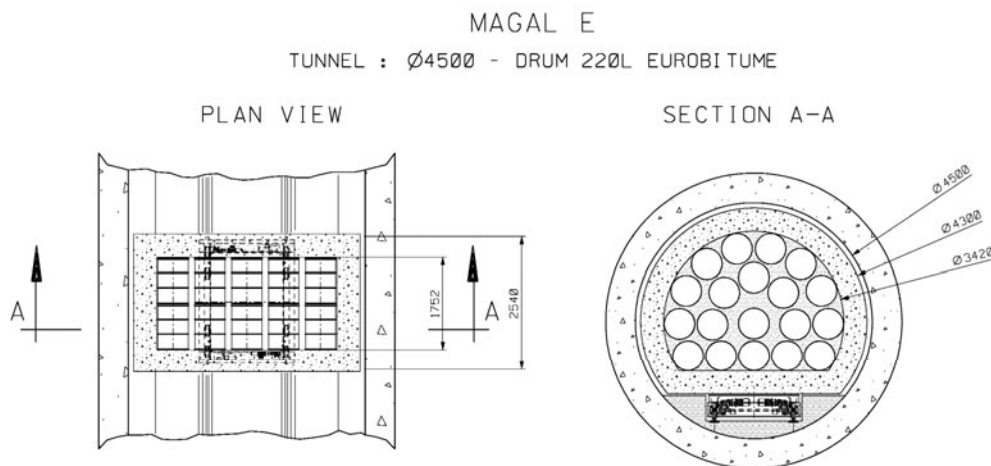


Figure 5.1.8 Schéma du concept retenu par l'ONDRAF (Belgique)

⁶¹ Société coopérative nationale pour l'entreposage des déchets radioactifs

⁶² Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies

Au Japon, le concept retenu pour un site sédimentaire générique est un tunnel de section circulaire de 10 m de diamètre utile. L'espace entre les colis et le revêtement du tunnel est comblé après la mise en place des colis. Plusieurs types de matériaux sont envisagés [60].

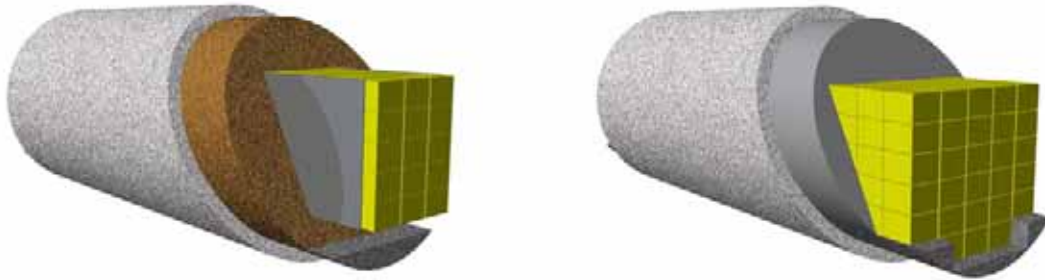


Figure 5.1.9 Schéma du concept retenu par JNC (Japon) en site sédimentaire

En Allemagne, le projet Konrad vise à stocker des déchets radioactifs non exothermiques dans une couche marnocalcaire d'une ancienne mine de fer (Konrad en Basse-Saxe). Les colis primaires sont regroupés dans des colis de stockage cylindriques ou parallélépipédiques non irradiants (voir section 4.1.2). Les chambres de stockage sont soit des chambres existantes éventuellement élargies et/ou allongées, soit de nouvelles chambres. Elles ont une largeur de 7 m et une hauteur de 6 m environ. Leur longueur peut atteindre 1 000 m. Les colis mis en place à l'aide d'un chariot élévateur sont empilés sur 3 niveaux. Après remplissage d'une longueur de 50 m d'alvéole de stockage, un mur en béton est érigé pour isoler ce tronçon d'alvéole et les vides de ce tronçon sont comblés par un matériau cimentaire par pompage.

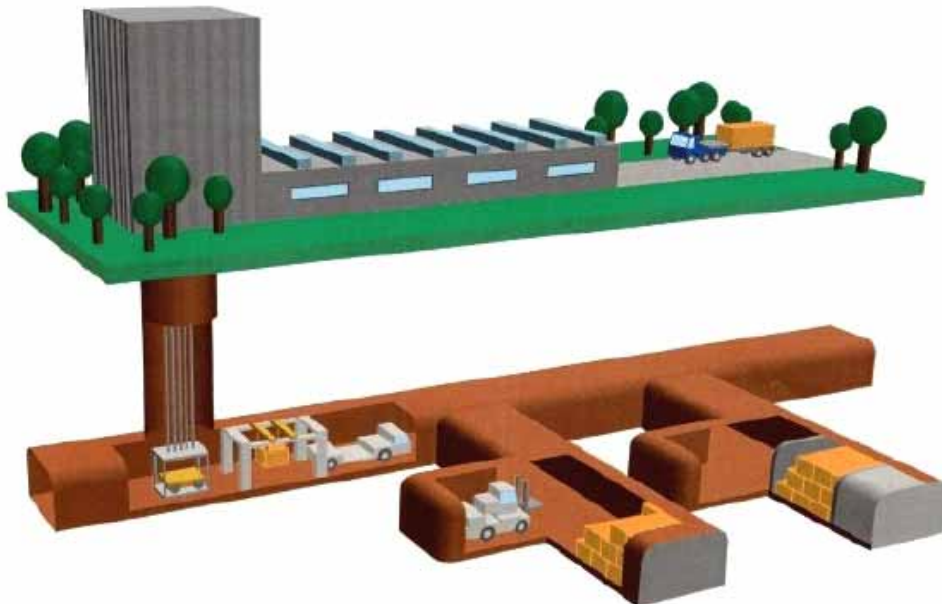


Figure 5.1.10 Schéma du concept de stockage retenu par DBE (Allemagne) au site de Konrad

Cette synthèse montre que les concepts d'alvéoles étudiés à l'étranger pour les déchets de type B ou assimilés dans des roches sédimentaires présentent des similarités avec le concept envisagé par l'Andra.

Les alvéoles sont des tunnels horizontaux de dimension du même ordre de grandeur que celle des alvéoles étudiées par l'Andra (jusqu'à 10 ou 15 m). Des différences existent en termes de revêtement du fait du comportement mécanique des diverses roches hôtes.

Certains concepts étrangers mentionnés ci-dessus intègrent un comblement des vides alors que d'autres, comme celui de l'Andra, privilégient une minimisation des vides par un choix approprié de la géométrie de la chambre de stockage et du moyen de manutention.

5.1.3 Description et dimensionnement de l'alvéole et de la galerie d'accès

La présente section est dédiée à la description de l'alvéole et de son équipement en configuration d'exploitation ainsi que de la galerie d'accès. Elle expose également les principaux résultats des calculs de dimensionnement mécanique et montre comment les considérations relatives à l'intégrité du milieu géologique, à l'environnement physico-chimique des colis, à la mise en place des colis et à la sûreté du stockage sont prises en compte dans le choix des matériaux et la conception [61].

5.1.3.1 Caractéristiques d'ensemble

La description des principes de conception de l'alvéole de stockage de déchets B fournie précédemment a mis en exergue l'existence de trois parties :

- la partie utile (ou corps) qui contient les colis de stockage ;
- la tête qui est dédiée à l'extraction des colis de leur hotte de transfert et à la protection radiologique du personnel lors des opérations de mise en stockage⁶³ ;
- la galerie d'accès où sera placé le scellement de l'alvéole.

La partie utile comporte trois éléments principaux (Figure 5.1.11). Le soutènement et le revêtement⁶⁴ assurent la stabilité de l'alvéole. Le radier et son équipement permettent le déplacement de l'engin de manutention et la reprise du poids des colis. Enfin, des tubes noyés dans la partie sommitale du revêtement permettent la ventilation de l'alvéole.

Le fond de l'alvéole est constitué d'un tympan et d'un mur poreux de ventilation. La tête de l'alvéole est équipée d'un sas permettant le transfert des colis entre les hottes de protection radiologique et le corps de l'alvéole irradiant et inaccessible au personnel.

⁶³ Sauf pour les alvéoles contenant les colis les moins irradiants, qui n'ont pas besoin de sas.

⁶⁴ Le soutènement, placé au fur et à mesure du creusement, assure la stabilité de l'excavation durant les travaux de construction. Le revêtement a pour rôle de maintenir cette stabilité sur une grande durée (plusieurs siècles)

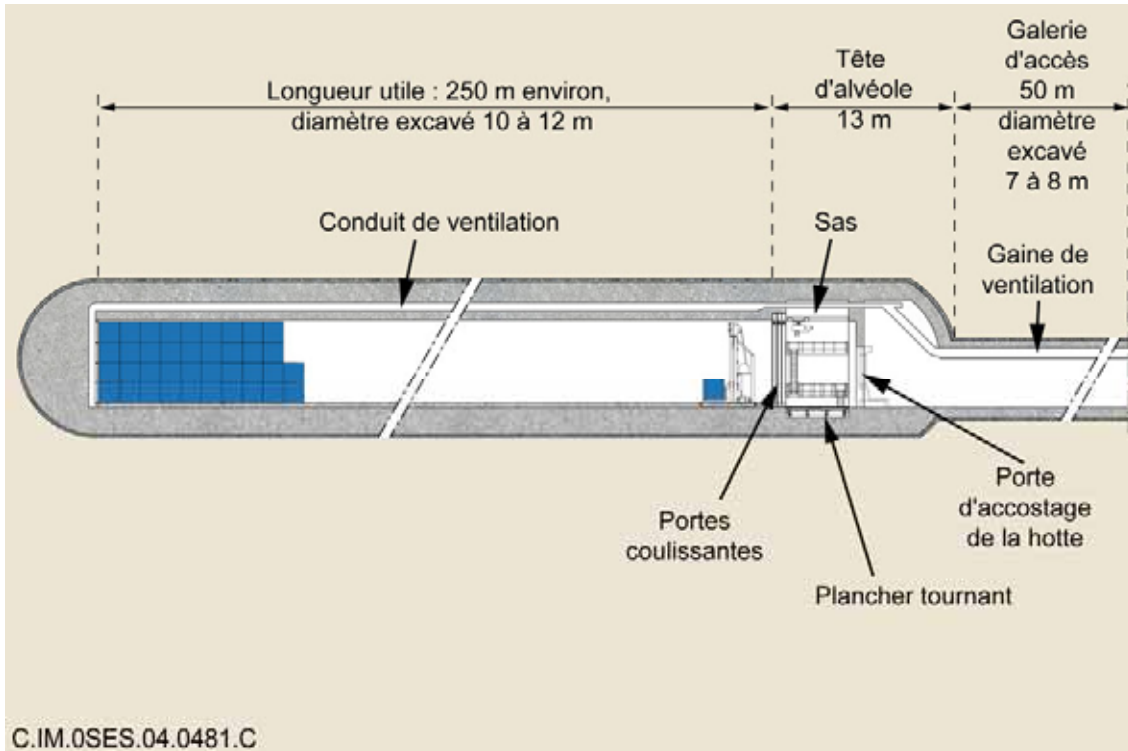


Figure 5.1.11 Alvéole B en exploitation

5.1.3.2 Description détaillée de l'alvéole en configuration d'exploitation

- **Description de la partie utile de l'alvéole**

La partie utile de l'alvéole est une galerie de diamètre excavé compris entre 10 et 12 m. La forme de l'excavation est quasi circulaire ou en fer à cheval, pour s'adapter au mieux aux différentes dimensions de colis, de façon à minimiser les volumes excavés et les volumes de béton, tout en ne faisant travailler le béton du revêtement qu'en compression. Pour tendre à la longévité maximum de la structure de l'alvéole, les quantités d'acier sont minimisées pour s'affranchir d'une éventuelle corrosion.

La Figure 5.1.12 illustre les différents composants de la partie utile de l'alvéole.

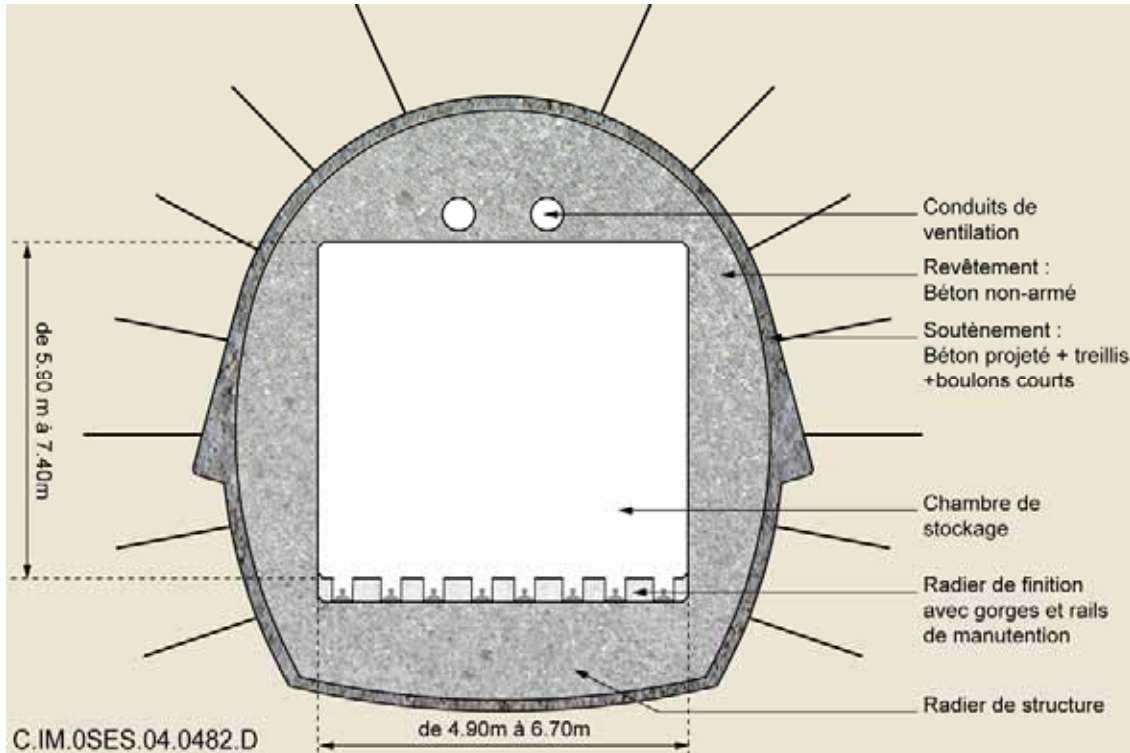


Figure 5.1.12 Section courante d'une alvéole B

Le soutènement de l'alvéole est conçu pour assurer la sécurité du chantier tout en minimisant les perturbations à long terme. À cet égard, pour minimiser la perturbation de l'argilite et limiter autant que possible l'introduction de composants métalliques dans l'alvéole, le soutènement est composé de boulons courts en acier, de 2,40 m de longueur, qui n'excèdent donc pas l'extension de la zone d'argile microfissurée⁶⁵. Un treillis soudé en acier et un béton projeté de type B40⁶⁶, d'épaisseur 25 cm et muni de fibres de verre complètent le dispositif. Cette solution a été préférée aux solutions plus classiques telles que des cintres métalliques ou des boulons longs de 5 m qui auraient pénétré plus largement dans la roche et éventuellement agrandi la zone d'argilites endommagées en paroi. Le diamètre de l'alvéole impose de creuser et de soutenir la section de l'alvéole en deux temps. Les contraintes de mise en place du soutènement amènent à constituer des « pattes d'éléphant » à mi-hauteur de la galerie.

L'anneau de revêtement et le béton de remplissage, bien qu'ayant des fonctions différentes, sont coulés comme un seul ensemble pour des raisons de construction. L'anneau de revêtement (avec le radier de structure) travaille uniquement en compression et n'est pas armé (Figure 5.1.13). Un dimensionnement préliminaire donne à cet anneau résistant une épaisseur d'environ 70 cm pour un béton de type B60. Le béton de remplissage délimite la chambre de manutention rectangulaire. Des joints secs⁶⁷ sont pratiqués dans le béton de remplissage pour ne pas perturber le régime des contraintes dans l'anneau résistant. Des suspentes en acier inoxydable renforcent localement le béton de remplissage.

Le radier est non armé et solidaire du revêtement. Il est équipé de rails pour la manutention des colis.

⁶⁵ En variante, on peut envisager d'utiliser des tiges en composite fibre de verre - résine, et/ou d'utiliser un scellement à la résine

⁶⁶ Béton dont la résistance à la compression simple est de 40 MPa

⁶⁷ Rainures pratiquées dans le béton et laissées vides

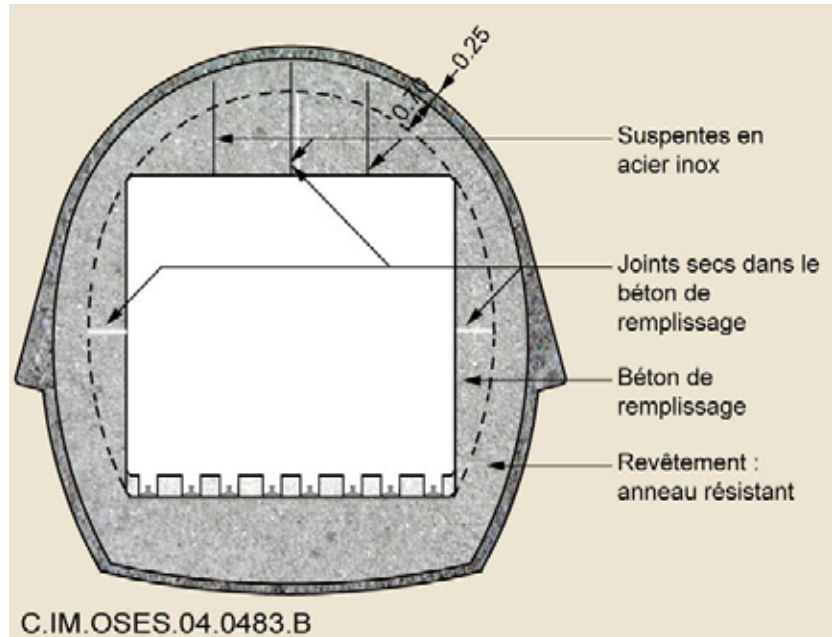


Figure 5.1.13 Anneau résistant et béton de remplissage

Deux conduits de ventilation de diamètre 600 mm sont ménagés dans le béton de remplissage (Figure 5.1.14). Le fond de l'alvéole est spécifiquement équipé pour les besoins de la ventilation. Il est doté sur toute la section d'un mur percé de trous, permettant du fait de sa forte résistance aéraulique et de la position des trous, de réguler le débit d'air dans l'alvéole. Derrière ce mur, débouchent les conduits de ventilation assurant le retour d'air de l'alvéole.

Le fond d'alvéole a une forme sphérique. Le soutènement comporte des boulons subhorizontaux de longueur 2,40 m et 25 cm de béton projeté. Le revêtement en béton est légèrement armé à la jonction du fond et de la section courante.

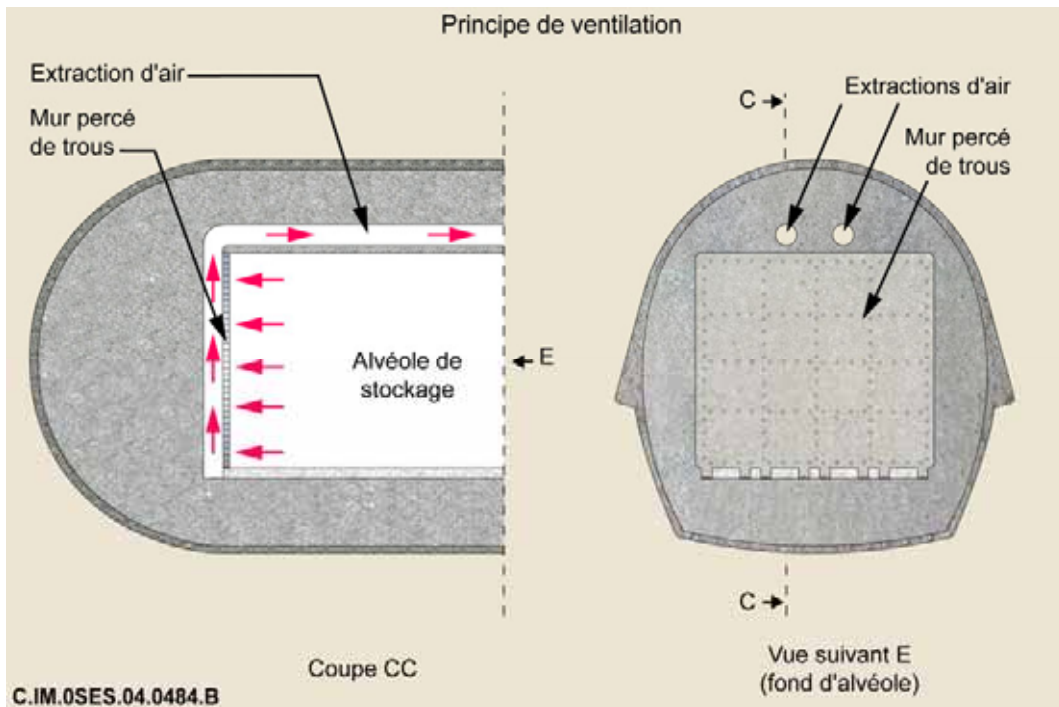


Figure 5.1.14 Coupe longitudinale et section du fond d'alvéole

- **Disposition des colis dans l'alvéole**

Tous les colis de stockage mis en place dans une même alvéole ont les mêmes dimensions⁶⁸. En fonction de leur taille, ils sont disposés sur 3 ou 4 niveaux et sur 2 à 4 colonnes dans le sens transverse de l'alvéole (Figure 5.1.15). Un jeu de 15 cm est laissé entre le haut des colis et le toit de la chambre de manutention. Un jeu de 10 cm est laissé transversalement entre les colonnes de colis et entre les colis et les parois verticales de la chambre de manutention. Dans le sens longitudinal, les jeux sont réduits au minimum. Ces jeux sont suffisants pour permettre la manutention des colis et la ventilation de l'alvéole.

Avec ces espacements, les vides entre colis représentent environ 5 % de la section excavée de l'alvéole. On notera qu'il serait possible de réduire encore ces vides en mettant en place un bloc de remplissage d'une dizaine de centimètres d'épaisseur au-dessus de chaque pile de colis, et en diminuant l'espacement entre colonnes de colis au prix d'une amélioration de la précision du système de manutention.

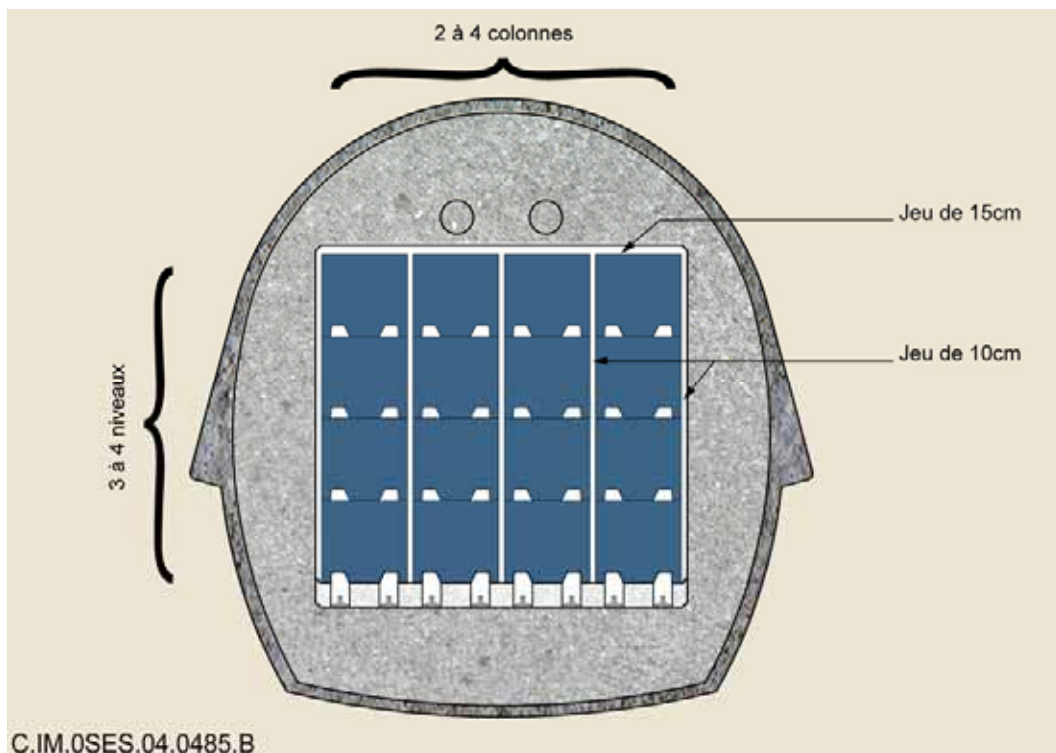


Figure 5.1.15 Disposition des colis dans l'alvéole

- **Description de l'équipement de la tête d'alvéole (avant scellement)**

Les alvéoles B sont équipées d'un sas situé en tête d'alvéole (Figure 5.1.16). Il a pour fonction d'assurer la protection radiologique du personnel lors des opérations d'extraction des colis hors de leur hotte de transfert et de mise en stockage (ou de retrait). Le matériel de manutention utilisé pour ces opérations est télécommandé depuis l'extérieur du sas.

Le sas est constitué de deux portes. La porte externe (du côté de la galerie d'accès) est dotée d'un guichet sur lequel vient s'accoster la hotte de transfert. Cette porte permet également la sortie et l'entrée du chariot de manutention situé dans le sas. La porte interne (du côté du corps de l'alvéole) est constituée de plusieurs panneaux coulissants permettant le passage de ce même chariot pour le transfert des colis vers leur emplacement de stockage dans l'alvéole. Entre les deux portes, le sas ainsi

⁶⁸ Dans certains cas, on peut disposer de colis ayant la même hauteur et la même largeur (transversalement à l'alvéole) mais des longueurs différentes (longitudinalement à l'alvéole). Dans ce cas, les colis sont disposés par zones homogènes au sein de l'alvéole.

constitué est équipé d'un plancher mobile de translation et d'une table tournante qui permettent au chariot de manutention d'évoluer dans un espace restreint.

La ventilation dans la zone du sas est assurée d'une part par des gaines reliées aux conduits du corps de l'alvéole et d'autre part par des chicanes blindées au niveau des portes du sas.

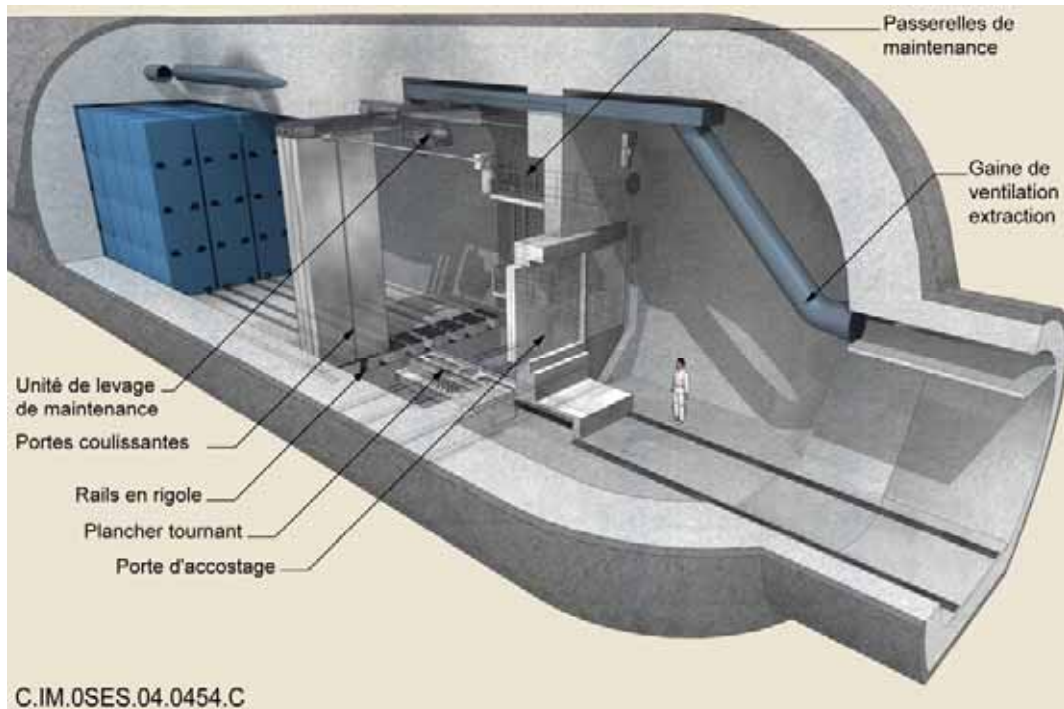


Figure 5.1.16 Sas d'accès aux alvéoles B

5.1.3.3 Description de la galerie d'accès

La galerie d'accès de l'alvéole est la zone où est prévue la réalisation du scellement de l'alvéole. À ce titre, la conception de cette galerie est très semblable à celle d'un tronçon de galerie à sceller tel que décrit dans le chapitre 7 (section « Fermeture des installations souterraines »). La seule spécificité de la galerie d'accès est l'adaptation de son diamètre utile à la taille des colis à stocker. Le diamètre utile est ainsi compris entre 5 et 6 m suivant les alvéoles, en fonction des colis qui y seront stockés.

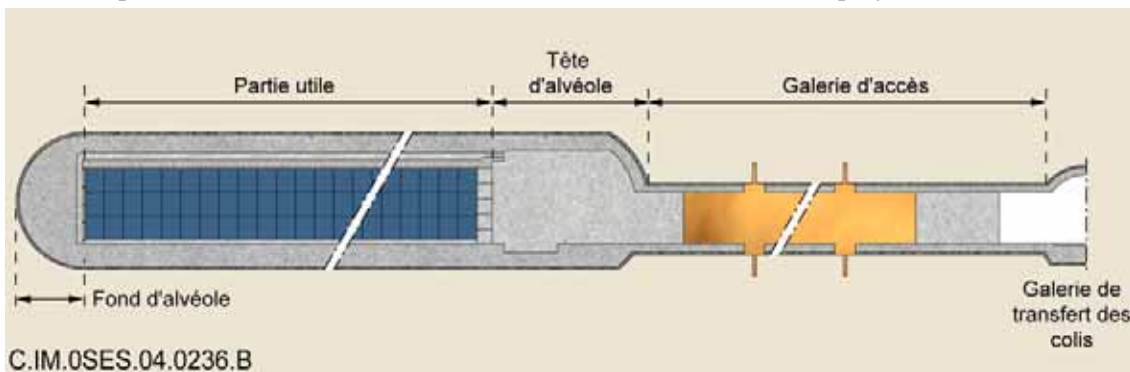


Figure 5.1.17 Coupe de l'alvéole B et de la galerie d'accès après scellement

5.1.3.4 Comportement thermique des alvéoles de stockage

Les déchets B sont non ou faiblement exothermiques. Certains colis de stockage (B5.1 et B5.2) présentent une faible puissance thermique résiduelle, de l'ordre de 50 W pour un colis de stockage contenant quatre colis primaires âgés d'une dizaine d'années (cf. figure 3.2-13 chapitre 3).

Bien que cet aspect soit peu dimensionnant dans la conception et l'agencement des alvéoles de déchets B, des modélisations thermiques des alvéoles ont été réalisées pour vérifier que la température maximale y était bien inférieure à 70 °C. Ces modélisations n'ont pas pris en compte l'effet favorable de la ventilation, de sorte que la conception soit indépendante des choix de gestion et en particulier de la durée de ventilation après mise en stockage. Les principales hypothèses adoptées pour ces études de dimensionnement thermique sont les mêmes que pour le dimensionnement thermique des alvéoles de déchets C (voir section 5.2), à savoir principalement un transfert de chaleur par conduction et rayonnement, des alvéoles voisines remplies simultanément avec les mêmes colis exothermiques, une température initiale de la roche de 22 °C.

Les modélisations montrent que, pour des colis stockés à l'âge de 10 ans, la température maximale dans l'alvéole reste ainsi toujours en dessous de 70 °C et redescend en dessous de 50 °C au bout d'un siècle environ.

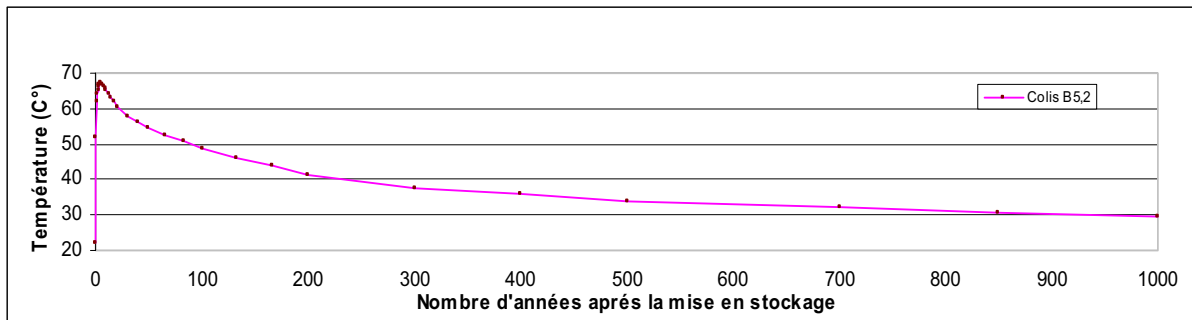


Figure 5.1.18 Température dans une alvéole de colis de type B5.2 stockés à 10 ans, sans prise en compte de la ventilation

Par ailleurs, la ventilation contribue à limiter l'échauffement dans l'alvéole (avant et après fermeture). L'air ventilé avec un débit de 3 m³/s peut évacuer de 80 à 90 % de la chaleur dégagée par les colis B5. On pourrait donc pour ces colis maintenir en permanence la température maximale au dessous de 50 °C en ventilant l'alvéole pendant environ 25 ans⁶⁹.

5.1.3.5 Dimensionnement mécanique de l'alvéole

● Dimensionnement du soutènement et du revêtement de l'alvéole

Le dimensionnement mécanique des alvéoles consiste principalement à définir le soutènement et le revêtement en section courante. Le soutènement est dimensionné pour garantir la sécurité du chantier de construction sur une durée maximale d'un an. Le revêtement est dimensionné pour garantir sa stabilité mécanique sur une durée au moins séculaire, conformément à l'usage pour des ouvrages de génie civil tels que les tunnels routiers ou ferroviaires [61].

Les effets thermiques sont limités à quelques alvéoles.

Les études montrent par ailleurs que la tenue au séisme n'est pas dimensionnante [57].

Hypothèses géotechniques retenues

Le comportement instantané des argilites peut être modélisé par une loi élastoplastique avec apparition de déformations plastiques irréversibles avant d'atteindre la rupture. La prise en compte de ce comportement complexe n'est pas requise pour les calculs de dimensionnement, pour lesquels on a admis des simplifications conformes aux règles de l'art. Les argilites sont en particulier considérées comme étant élastiques jusqu'à la résistance au pic, puis se comportant de manière parfaitement plastique après rupture. Les caractéristiques retenues, déduites d'essais de laboratoire en retenant les bornes basses des résultats obtenus (quartile à 20 %), sont les suivantes :

⁶⁹ Sans ventilation, la chaleur s'accumule dans le terrain à proximité de l'alvéole, alors que la ventilation l'évacue définitivement à l'extérieur. En conséquence, après l'arrêt de la ventilation, la température reste toujours en dessous de ce qu'elle aurait été sans phase de ventilation.

- résistance à la compression simple de la masse rocheuse (Rc) : 12 MPa ;
- cohésion : 4.5 MPa ;
- angle de frottement interne : 25° ;
- module de Young : 3 800 MPa.

Le choix de ce modèle de comportement (élastique plastique parfait) avec des propriétés minimales conduit à une évaluation maximisante des contraintes appliquées sur le soutènement et sur le revêtement.

Le comportement différé des argilites soumises à une contrainte anisotrope est du type viscoplastique, ce qui signifie que la roche se déforme lentement lorsqu'elle est soumise à cette contrainte. Par souci de conservatisme, aucune valeur minimale de contrainte susceptible d'arrêter cette déformation différée n'a été introduite : la roche est donc supposée se déformer jusqu'à atteindre un état de contraintes isotropes. La loi viscoplastique retenue est du type Lemaître. Les caractéristiques assignées à cette loi, issues de l'extrapolation conservatrice d'essais de laboratoire, conduisent à prédire des déformations différées relativement élevées pour ce type de roche (de l'ordre de 1,2 % de convergence différée pour un tunnel non revêtu, sur 100 ans). L'effet favorable de la désaturation de la roche au voisinage de l'alvéole, qui ralentit les déformations différées et améliore les caractéristiques mécaniques de la roche, n'a pas été pris en compte, alors que ce phénomène pourra se faire sentir non seulement avant la fermeture de l'alvéole, mais aussi pendant plusieurs siècles au-delà⁷⁰.

Les contraintes initiales sont supposées isotropes dans le plan perpendiculaire aux alvéoles, avec une contrainte naturelle in situ de 12 MPa à 500 m de profondeur.

Principe du calcul et critères de dimensionnement

Pour tenir compte des incertitudes sur l'estimation des sollicitations auxquelles est soumis l'ouvrage et sur les caractéristiques des matériaux employés, la méthode utilisée est celle préconisée par les règlements tels que l'Eurocode[45]. Cette méthode fait appel à des coefficients de sécurité pour tenir compte des incertitudes sur l'estimation des sollicitations qui s'exercent sur l'ouvrage à dimensionner et sur les caractéristiques des matériaux employés.

Deux types de calculs numériques ont été effectués : des calculs par éléments finis, qui permettent de prendre en compte le détail de la géométrie de l'ouvrage, et, à titre de vérification et pour les études de sensibilité, des calculs par la méthode classique convergence – confinement⁷¹, qui est une approche simplifiée applicable à un ouvrage de section circulaire.

Les résistances de béton prises en compte ont été choisies de manière prudente, en prenant en compte, comme cela se fait de manière usuelle, le vieillissement du béton par l'intermédiaire de coefficients de sécurité définis par les règles de l'art. Or, le béton d'une alvéole est soumis à un environnement physico-chimique plus favorable que les bétons considérés pour l'établissement des règles de l'art, qui sont soumis aux intempéries climatiques et à des variations saisonnières de température.

Articulation entre soutènement et revêtement - synthèse de la problématique

Le rôle du soutènement est d'assurer la sécurité du chantier pendant la phase de construction. Le rôle du revêtement est d'assurer la stabilité de l'ouvrage pendant toute la durée d'exploitation.

Le dimensionnement du soutènement doit lui permettre de supporter les déformations instantanées directement liées à l'avancement du creusement de la galerie, et les déformations différées dues au comportement visqueux de la roche, avant la mise en place du revêtement. Le dimensionnement du revêtement doit lui permettre de résister aux déformations différées après sa mise en place.

À cet égard, retarder la pose du revêtement présente l'avantage de favoriser la détente du terrain, limitant ainsi les efforts à reprendre ultérieurement par le revêtement, mais l'inconvénient de

⁷⁰ La roche se désature sur plusieurs dizaines de centimètres sous l'effet de la ventilation. La resaturation intervient après l'arrêt de la ventilation. Cette resaturation est très lente du fait de la très faible perméabilité de l'argilite

⁷¹ La méthode convergence confinement utilise les courbes effort – déformation du revêtement (ou du soutènement) et du terrain. L'équilibre du système revêtement – terrain est trouvé à l'intersection de ces deux courbes.

prolonger la durée de fonctionnement du soutènement, qui doit en conséquence être renforcé. Il s'agit donc de trouver un compromis.

La loi viscoplastique retenue conduit à différer la pose du revêtement pour éviter de mettre en œuvre des quantités trop grandes de béton. Une pose du revêtement 6 mois après le creusement est envisagée. Le soutènement est dimensionné pour tenir une année, laissant ainsi une flexibilité de plusieurs mois pour la pose du revêtement.

Par prudence, et suivant l'usage, la contribution du soutènement à la stabilité de l'ouvrage à long terme n'a pas été prise en compte dans le dimensionnement du revêtement.

Résultats pour le soutènement

Les résultats ci-après concernent les options de soutènement suivantes : pour des raisons de sécurité les boulons sont posés juste derrière le front, le béton projeté est mis en œuvre à une dizaine de mètres du front, car, d'après le calcul, le béton projeté n'est pas stable s'il est mis très près du front.

Les boulons d'ancrage, d'une longueur de 2,4 m, sont implantés selon une maille de 1,5 m x 1,5 m et associés à du treillis soudé. Ils assurent un épinglage superficiel à l'intérieur de l'argilite microfissurée.

L'épaisseur de béton projeté, de type B40, est dimensionnée à 25 cm en voûte pour une durée d'attente d'un an. Cette épaisseur ne serait que 15 cm pour une durée d'attente de 6 mois.

Le calcul montre par ailleurs que le front de taille est stable. Un renforcement provisoire du front n'est pas nécessaire.

Résultats pour le revêtement

Les résultats indiqués ici correspondent à un revêtement posé à 6 mois et dimensionné, comme les grands ouvrages de génie civil actuels, pour une durée de vie séculaire. Pour une galerie d'un diamètre excavé de 10,50 m (valeur moyenne sur l'ensemble des alvéoles), et en forme de fer à cheval, on obtient, pour du béton de type B60, une épaisseur en voûte de 70 cm. Au niveau du piédroit, l'épaisseur est de 95 cm. À la jonction entre le piédroit et le radier, qui est la zone la plus sollicitée, l'épaisseur de béton atteint 1,40 m.

Avec la forme choisie, le revêtement est sollicité uniquement en compression, et ne nécessite donc pas de ferrailage.

Analyse de la performance de durabilité du revêtement

La Figure 5.1.19 montre en fonction du temps l'évolution de la charge exercée par le terrain sur le revêtement. On voit que la pression exercée par le terrain sur le revêtement est de l'ordre de 3,5 MPa à 100 ans. L'augmentation de pression au-delà du siècle est inférieure à 0,5 MPa par siècle⁷². Le revêtement pourrait théoriquement supporter une pression de l'ordre de 8 MPa, on constate que les marges de sécurité et de dimensionnement prises en compte permettent d'envisager la stabilité de l'alvéole sur plusieurs siècles, en lien avec la faible vitesse d'accroissement de la poussée du terrain sur le revêtement.

⁷² Le choix de valeurs pénalisantes pour représenter les déformations différées des argilites conduit à surestimer la pression subie par le revêtement à 100 ans et son augmentation au-delà.

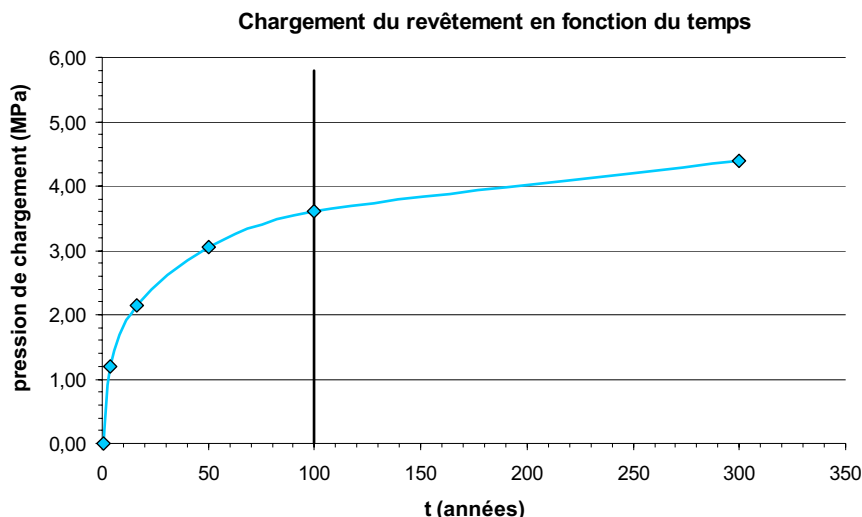


Figure 5.1.19 Evolution du chargement du revêtement en fonction du temps

Sensibilité du dimensionnement aux hypothèses

Comme indiqué précédemment, la désaturation en paroi des alvéoles tend à diminuer la vitesse des déformations différées. Pour estimer la sensibilité du dimensionnement à ce phénomène, l'effet d'une diminution de la vitesse des déformations différées de 25 %⁷³ a été analysé. Cette analyse montre que le revêtement tel qu'il a été dimensionné serait moins chargé de 0,5 MPa sur la période s'étendant de 100 à 300 ans après la construction. Cette diminution de la charge sur le revêtement à un siècle pourrait permettre d'envisager une réduction de l'épaisseur du revêtement d'une dizaine de centimètres.

Pour les alvéoles contenant des déchets faiblement exothermiques, la température intervient dans le dimensionnement, d'une part par l'effet de la dilation thermique du béton et de la roche, et d'autre part par l'accélération des déformations différées des argilites. Suivant la puissance thermique des colis et la durée de la phase de ventilation de l'alvéole avant sa fermeture, il pourrait être nécessaire d'augmenter l'épaisseur du revêtement de 20 à 40 %.

5.1.3.6 Matériaux constitutifs de l'alvéole et de la galerie d'accès et impact sur l'argilite et les colis

Le matériau constitutif essentiel de l'alvéole et de la galerie d'accès est le béton. Il a été choisi pour ses qualités de durabilité et l'environnement physico – chimique favorable qu'il procure aux colis de stockage. D'autres matériaux sont nécessaires en plus petite quantité, tels qu'acier ou, en variante, composites de fibre de verre et de résine.

● Le béton

Le béton envisagé entre dans la catégorie des BHP (béton de haute performance) qui sont maintenant d'usage courant dans la construction des infrastructures de génie civil. Les performances mécaniques de ce type de béton proviennent du type de ciment utilisé et de sa teneur élevée en ciment (en moyenne 400 kg/m³). Un adjuvant (filler calcaire) est introduit dans la composition du béton pour réduire le dégagement de chaleur relativement important de ce type de ciment lors de la prise et pour ainsi diminuer la fissuration d'origine thermique.

On rappelle que le béton n'a pas de fonction de barrière hydraulique au sein de l'alvéole. Le BHP présente deux avantages importants pour les alvéoles de déchets B : grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées, il permet de réduire l'épaisseur de revêtement et donc de diminuer le volume

⁷³ Ce qui revient à diviser par 3 le coefficient d'Arrhenius de la loi de Lemaitre

excavé pour un volume utile donné et sa faible porosité favorise sa tenue à long terme en minimisant les interactions avec les eaux venant de la roche. Les joints de construction et la fissuration possible du béton ne remettront pas en cause la durabilité et la résistance de l'ouvrage, qui travaille uniquement en compression.

Par ailleurs, pour les alvéoles contenant des déchets bitumés (colis type B2), on adaptera la composition du béton pour maintenir le pH dans l'alvéole à une valeur inférieure à 12,5.

Les phénomènes d'interaction entre les argilites et le matériau de revêtement en béton susceptibles de dégrader les propriétés de rétention des argilites concernent principalement la zone de roche fracturée (d'extension estimée à quelques décimètres) [48]. L'extension des perturbations chimiques est donc faible et n'a pas d'impact sur les propriétés des argilites dans la zone de garde de la couche au-dessus et en dessous du stockage.

● **Les autres matériaux**

On cherche à limiter la quantité d'acier laissée dans l'alvéole à sa fermeture, pour éviter les problèmes mécaniques liés à la corrosion et au gonflement des produits de corrosion, et pour limiter à long terme la production d'hydrogène par corrosion. En particulier, le matériel de manutention et le sas, constitués d'importantes quantités d'acier, sont récupérés avant la fermeture de l'alvéole.

L'anneau résistant du béton de revêtement est en compression et ne nécessite donc pas d'armature. L'utilisation de l'acier dans le soutènement et le revêtement se limite donc au treillis soudé de protection posé à l'avancement en même temps que les boulons de soutènement et aux suspentes pour accrocher le béton de remplissage à l'anneau résistant.

On notera que ces aciers peuvent être choisis inoxydables pour retarder et diminuer les effets de la corrosion. En variante, des matériaux de type composite fibre de verre – résine peuvent être envisagés pour remplacer certains aciers.

5.1.3.7 Sûreté criticité

Une analyse de sûreté – criticité a été menée en deux étapes. Tout d'abord, une analyse préliminaire du risque au niveau de l'ensemble des colis de déchets B a permis (i) de montrer le caractère non dimensionnant de la criticité pour la plupart des colis de stockage et alvéoles B et (ii) d'identifier les colis enveloppes nécessitant une étude plus fine du risque de criticité (colis B5 en particulier). Une analyse plus approfondie a alors permis de vérifier que l'aspect criticité n'est pas dimensionnant pour les alvéoles de déchets B [55].

5.1.3.8 Gestion des gaz et ventilation de l'alvéole

La grande majorité des colis B dégage en faible quantité de l'hydrogène (quelques litres ou dizaines de litres par an et par colis) et des traces de radionucléides gazeux. Une ventilation des alvéoles permet d'évacuer ces gaz pendant l'exploitation, sans affecter le personnel qui travaille toujours en amont aérage des alvéoles. Il est à noter que le niveau de production d'hydrogène est suffisamment faible pour que l'on puisse envisager sans danger des arrêts de ventilation de plusieurs semaines.

Les études menées à ce jour montrent qu'avec les espacements envisagés entre les colis, un débit d'air de l'ordre de 3 m³/s est suffisant pour assurer une bonne ventilation d'une alvéole en cours de remplissage ou remplie. L'alimentation en air frais se fait en pleine section de galeries depuis les puits d'entrée d'air jusqu'à l'alvéole. Au niveau de la tête d'alvéole, l'air traverse le sas par des orifices avec chicanes (pour protéger le personnel du risque d'irradiation).

Le retour d'air s'effectue à travers le fond de l'alvéole, puis par des réservations dans le béton, et enfin par une gaine qui rejoint le système de retour d'air général. La régulation des débits d'air est réalisée par le mur percé situé au fond de l'alvéole et par des clapets réglables situés dans les gaines de ventilation.

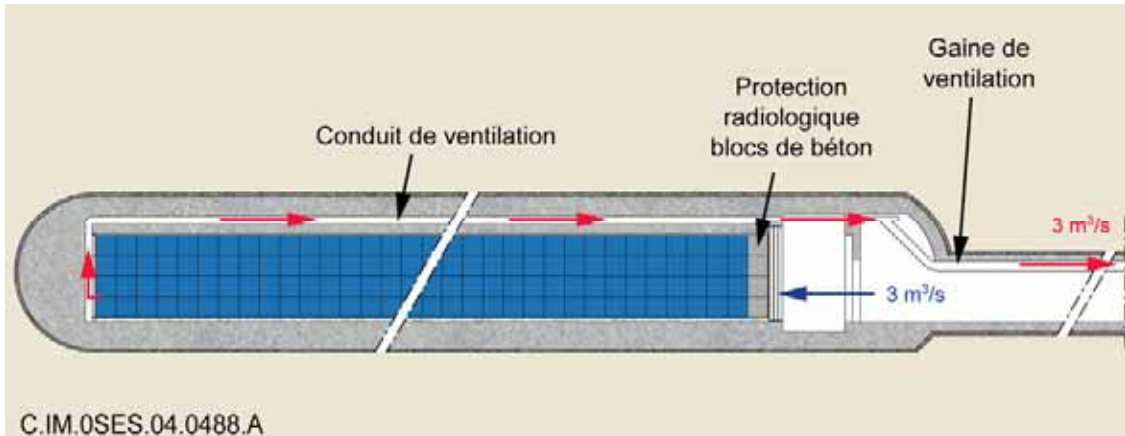


Figure 5.1.20 Ventilation de l'alvéole B en attente de scellement

La ventilation induit peu de perturbations mécaniques et chimiques au sein des alvéoles (voir chapitre 10.2). En effet, la désaturation de la roche en paroi par de l'air relativement sec tend à augmenter la tenue mécanique de l'alvéole, sans étendre la zone de roche endommagée au voisinage [57] ; l'oxydation des argilites par l'air ainsi apporté reste très limitée à une zone fortement désaturée d'épaisseur d'ordre décimétrique. En outre, les perturbations liées à l'oxydation des matériaux métalliques présents dans l'alvéole sont fortement limitées par la faible quantité de métaux introduits dans l'alvéole (hors colis) et la dégradation du béton par carbonatation atmosphérique ne concerne qu'une épaisseur au maximum d'ordre centimétrique, en particulier à cause de la faible porosité connectée du béton BHP.

5.1.3.9 Compatibilité de la conception avec la méthode de mise en place des colis de stockage

La conception de l'alvéole est indissociable de celle du système de manutention et de mise en place des colis. À cet égard deux éléments sont d'une importance significative : la compatibilité des jeux fonctionnels avec les performances des équipements de manutention et la logique de radioprotection du personnel pendant les opérations de mise en stockage.

En matière de jeu fonctionnel, la minimisation des vides résiduels au sein de l'alvéole implique la dépose et l'empilement des colis avec une bonne précision (de l'ordre de quelques centimètres). Le principe de positionnement envisagé pour le chariot de manutention (décrit au chapitre 9 relatif aux moyens d'exploitation) est fondé sur l'utilisation de codeurs et de capteurs éventuellement doublés par un système laser. Un tel équipement couramment utilisé dans l'industrie permet de garantir la cohérence entre l'objectif de minimisation des jeux et les performances du système de manutention envisagé.

En matière de radioprotection pendant le transfert des colis depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles, la protection du personnel est assurée par les hottes de transport dans un premier temps puis par le sas de la tête d'alvéole dans un deuxième temps. Le chariot de manutention de l'alvéole est télécommandé et le personnel ne rentre pas dans le sas pendant les opérations de mise en place des colis. Le chariot de manutention extrait le colis de sa hotte, le transfère dans la chambre de stockage et le met en place.

5.1.4 Agencement des différents types d'alvéoles de déchets B

La standardisation des colis de stockage présentée au chapitre 4 permet un regroupement de plusieurs types de colis différents dans une même alvéole (co-stockage). Au stade actuel des connaissances, certains regroupements sont néanmoins évités pour limiter les interactions potentiellement néfastes vis-à-vis de relâchement des radionucléides [61].

Pour illustrer les possibilités en la matière, un scénario possible de co-stockage a été défini, sur la base de l'inventaire des colis présenté au chapitre 3, en respectant d'une part les contraintes de séparation de certains colis types et d'autre part les contraintes géométriques des colis standardisés. Ainsi, ce scénario sépare les colis contenant des matières organiques susceptibles de relâcher des espèces chimiquement complexantes, des autres colis. Il éloigne suffisamment les alvéoles de déchets bitumés (colis type B2) des autres alvéoles pour protéger ces déchets d'un éventuel échauffement. Enfin, il permet une gestion différenciée des colis produisant des gaz.

Ce scénario est tel que la hauteur et la largeur⁷⁴ de tous les colis de stockage destinés à être co-stockés dans une même alvéole sont identiques de façon à limiter le volume des vides résiduels autour des colis de stockage, à ne pas perturber le flux de ventilation longitudinal de la chambre de stockage et à standardiser la manutention. Pour les mêmes raisons, la hauteur et la largeur de la chambre de stockage sont constantes sur toute la longueur de l'alvéole, en exploitant la standardisation des colis de stockage (voir le chapitre 4).

Ces considérations ont conduit à identifier 10 types d'alvéoles différentes. À titre d'exemple, la Figure 5.1.21 schématise 4 sections d'alvéoles de différentes dimensions, avec les colis correspondants.

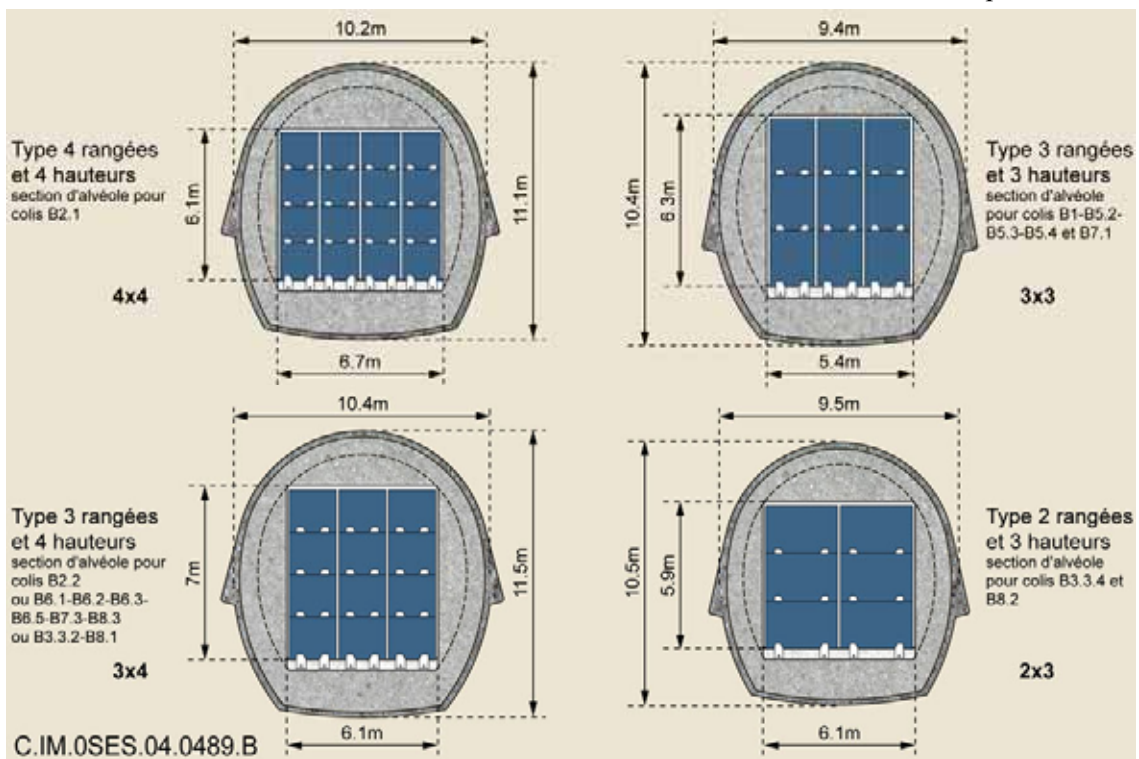


Figure 5.1.21 Sections d'alvéoles

Enfin, les distances ménagées entre les alvéoles évitent des interactions à très long terme. Il s'agit en particulier des colis contenant des matières organiques, dont les alvéoles de stockage peuvent être écartées des autres alvéoles. Dans le cas particulier des colis types B2, cette distance est suffisante pour maintenir la température au sein de l'alvéole à moins de 30 °C (voir chapitre 6).

⁷⁴ Dans le sens transverse de l'alvéole

5.1.5 Construction des alvéoles B

Le procédé de construction peut être subdivisé en trois processus élémentaires :

- le creusement ;
- la mise en place du soutènement permettant d'assurer la sécurité du chantier ;
- la mise en place du revêtement assurant la stabilité de l'ouvrage pendant toute la période d'exploitation et d'observation.

5.1.5.1 Mode de creusement

Plusieurs options peuvent être envisagées pour le creusement de l'alvéole : l'abattage par foration et tir à l'explosif, l'abattage par machine à attaque ponctuelle et la perforation par tunnelier en pleine face.

À ce stade des études, la technique de la machine à attaque ponctuelle (Figure 5.1.22) est privilégiée pour le creusement de la galerie d'accès et de l'alvéole. Cette technique est en effet bien adaptée aux caractéristiques de l'argilite et à la géométrie de l'alvéole. En comparaison, le tunnelier pleine face est une machine encombrante et moins adaptée à la configuration de l'alvéole, du fait de sa faible longueur (environ 250 m) et de la restriction de gabarit que constitue la galerie d'entrée de l'alvéole. Compte tenu des propriétés mécaniques de la roche et du diamètre de l'alvéole, il peut être nécessaire d'abattre la section de l'alvéole en deux passes, alors que la galerie d'entrée pourra être creusée en une seule passe.

5.1.5.2 Mise en place du soutènement et du revêtement

● L'alvéole

La mise en place du soutènement dans l'alvéole, composé de boulons courts, de treillis soudé et de béton projeté, comme décrit dans les sections précédentes, s'effectue à l'aide d'un jumbo de boulonnage (Figure 5.1.22) et d'une plateforme élévatrice. Le béton projeté est mis en place à l'aide d'un jumbo de projection.

Le choix de la méthode de mise en place du revêtement est lié à la méthode de soutènement. Il peut être constitué de béton coulé en place ou de béton préfabriqué sous forme de voussoirs. Pour un soutènement par boulons (ou par cintres), la première option doit être privilégiée. Il est à noter que dans le cas de l'utilisation de voussoirs la fonction de soutènement serait assurée par un bouclier solidaire de la machine de creusement.



Figure 5.1.22 Exemples de machine à attaque ponctuelle et de jumbo de boulonnage

- **La galerie d'accès**

Pour la galerie d'accès, on a retenu l'utilisation d'un soutènement par cintres et béton projeté, avec revêtement par béton coulé mis en place de manière différée. Cette technique permet de ne pas utiliser de boulons et de préserver ainsi, autant que possible, le terrain au droit de la zone de scellement.

5.1.5.3 Séquencement de la construction

La présente description s'attache essentiellement à la construction de l'alvéole proprement dite. Elle présente un séquencement possible des opérations à réaliser.

La construction est ainsi décomposée en plusieurs phases ; chaque phase est constituée d'une succession de cycles de travail qui est réalisée sur toute la longueur de l'alvéole avant le passage à la phase suivante.

- **1^{ère} phase : creusement et soutènement de la partie supérieure de la galerie**

Au cours de la première phase, illustrée sur la Figure 5.1.23, les travaux sont organisés en cycles de creusement – soutènement. Chaque cycle correspond à un avancement d'environ 1,50 m en fonction des besoins de soutènement de la roche. La machine à attaque ponctuelle creuse sur une profondeur de 1,50 m (en haut de la figure) et immédiatement après, on pose une rangée de boulons.

La mise en place du béton projeté (en bas de la figure) se fait à une dizaine de mètres en arrière du front, par passes d'environ 3 m. Si nécessaire, une mince couche de béton projeté peut être projetée jusqu'à front.

- **2^{ème} phase : creusement et soutènement de la partie inférieure de la galerie**

Une fois la partie supérieure de l'alvéole creusée et soutenue sur toute sa longueur, la phase suivante est le creusement et le soutènement de la partie inférieure de l'alvéole. Cette phase, illustrée sur la Figure 5.1.23 se déroule de manière comparable à la première phase.

- **3^{ème} et 4^{ème} phases : coulage du radier de béton puis de la voûte et des piédroits**

Une fois l'alvéole creusée et soutenue sur toute sa longueur, on passe au bétonnage définitif, d'abord du radier, puis de la voûte et des piédroits.

Le radier est coulé par plots, d'une longueur d'environ 12 m. Les plots peuvent être séparés par des joints secs pour diminuer la fissuration du béton.

Une fois le radier coulé sur toute la longueur de l'alvéole, on effectue le coulage de la voûte et des piédroits. Pour ce faire, on peut utiliser un coffrage mobile (Figure 5.1.24) au gabarit de la chambre de stockage. Le coulage se fait par plots d'environ 6 m. Comme pour le radier, ces plots peuvent être séparés par un joint sec.

- **5^{ème} phase : équipement de l'alvéole**

Après avoir terminé le revêtement de l'alvéole, il reste à l'équiper : construction d'un mur percé de trous au fond de l'alvéole pour réguler le flux d'air, mise en place du radier de finition, muni de gorges et de rails permettant la manutention, construction du sas et mise en place des éléments mécaniques (porte et matériel de manutention).

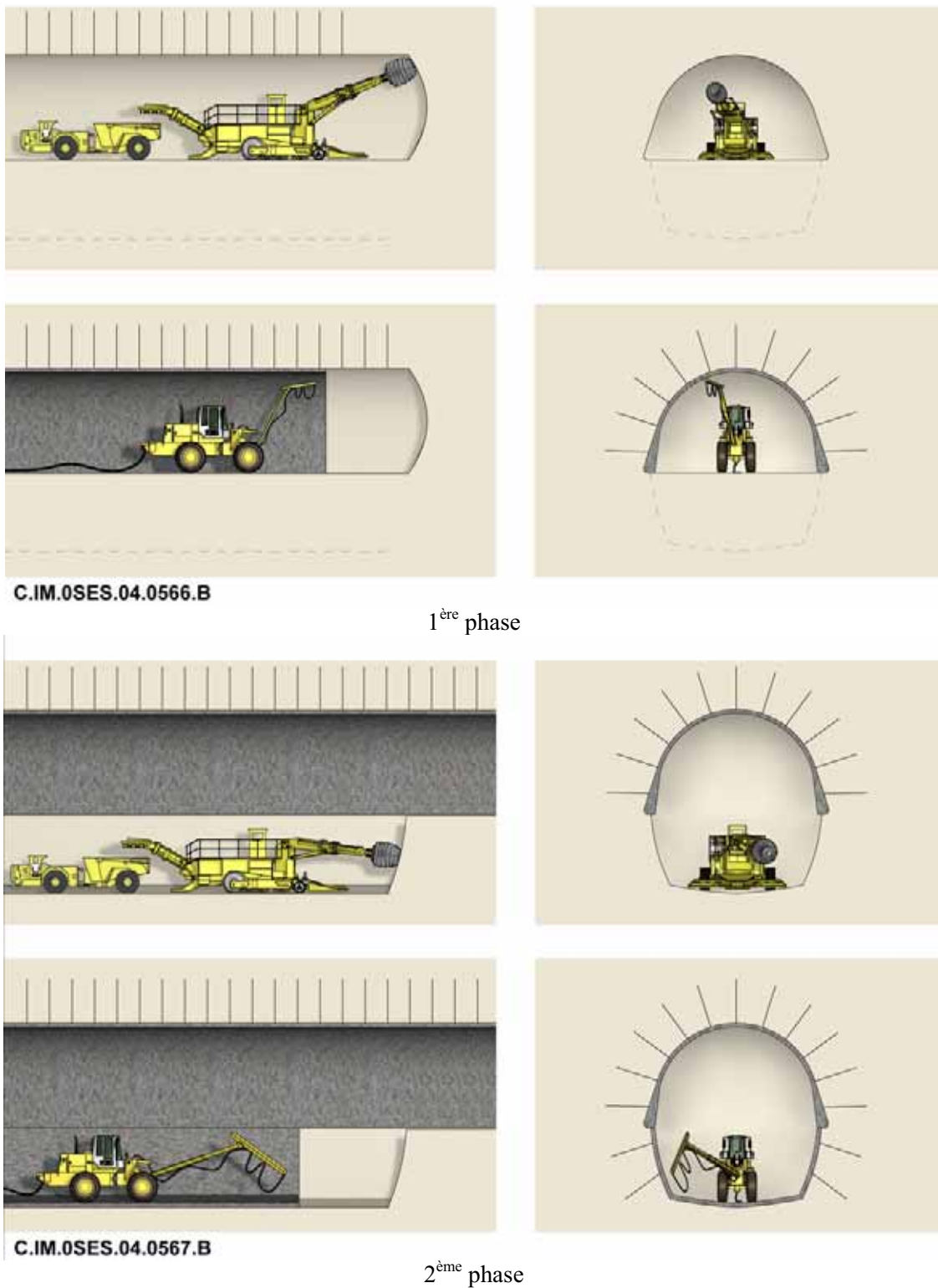


Figure 5.1.23 Creusement et soutènement d'une alvéole B en deux phases



Figure 5.1.24 Coffrage mobile pour tunnel

5.1.6 Fermeture de l'alvéole

Le scellement des alvéoles B est très semblable au scellement des galeries de liaison qui est décrit de façon plus détaillée à la section 7.6. Des dispositions particulières doivent cependant être prises pour protéger le personnel de l'irradiation, lors du démontage du matériel de la tête d'alvéole. Cette section décrit succinctement le principe de conception de la fermeture des alvéoles B, en s'attachant plus particulièrement aux aspects spécifiques à ces alvéoles [61].

5.1.6.1 Description sommaire de la fermeture des alvéoles

Comme illustré sur la Figure 5.1.25 l'ouvrage de fermeture de l'alvéole se compose d'amont en aval :

- d'un écran de radioprotection composé de blocs de béton ;
- d'un massif de remplissage de la tête d'alvéole qui sert aussi d'appui mécanique pour le noyau d'argile gonflante ;
- d'un noyau d'argile gonflante, qui est le composant essentiel assurant l'étanchéité du scellement ;
- de saignées remplies d'argile gonflante associées au noyau ;
- d'un massif d'appui en béton, qui pourra lui-même s'appuyer ultérieurement sur le remblai des galeries de liaison.

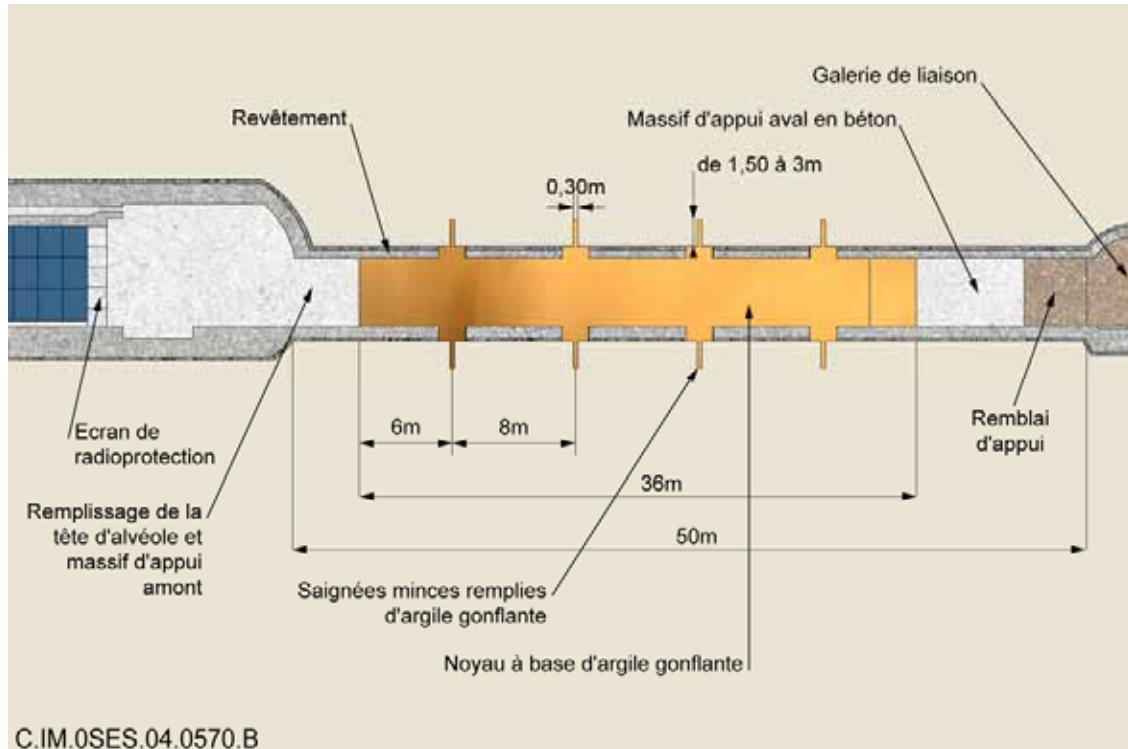
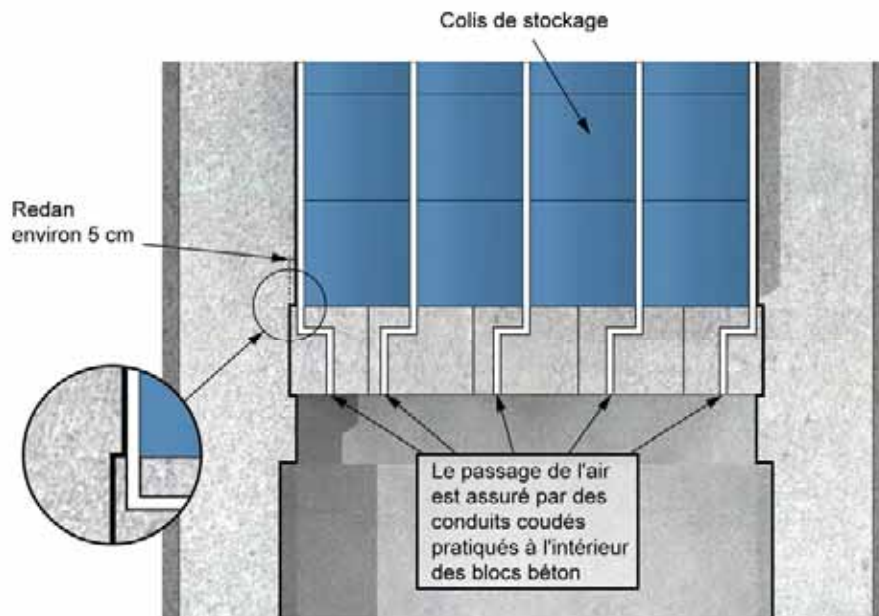


Figure 5.1.25 Schéma de principe de la fermeture de l'alvéole

5.1.6.2 Mise en place de la fermeture de l'alvéole

La fermeture de l'alvéole consiste à mettre en place progressivement de l'amont vers l'aval les différents composants du scellement. Les étapes spécifiques à la fermeture des alvéoles sont la mise en place de l'écran de radioprotection, le démontage du matériel et le remplissage de la tête d'alvéole.

L'écran de radioprotection est constitué d'une double rangée de blocs de béton, disposés en quinconce de façon à éviter le rayonnement diffusé. Un redan dans le béton de remplissage de l'alvéole permet d'éviter le rayonnement diffusé le long des parois de l'alvéole. Cet écran pouvant être mis en place plusieurs années avant la fermeture de l'alvéole, il est percé de trous coudés pour permettre le passage de la ventilation tout en assurant la protection radiologique. La Figure 5.1.26 donne le principe de cet écran de radioprotection. L'épaisseur de béton nécessaire atteint 120 cm pour les colis les plus irradiants.



C.IM.0SES.04.0594.A

Figure 5.1.26 Ecran de radioprotection (vue en plan)

Pendant et après la mise en place de cet écran, l'alvéole peut continuer à être ventilée normalement. Une fois l'écran de radioprotection mis en place, on peut procéder aux travaux de démontage de l'équipement de la tête d'alvéole, tout en conservant le bénéfice de la ventilation de l'alvéole.

Avant de remplir la tête d'alvéole, les conduits de ventilation situés dans le revêtement de l'alvéole sont remblayés avec un coulis de béton. Ensuite, le béton est coulé en masse dans la tête d'alvéole et constitue ainsi le massif d'appui amont du noyau argileux. Un coffrage perdu situé côté amont permet de désolidariser l'écran de radioprotection du béton de remplissage, de façon à faciliter le démontage de celui-ci dans le cas d'une récupération éventuelle des colis.

Les étapes suivantes sont identiques à celles de la mise en place d'un scellement en galerie, telle que décrite à la section 7.6.

5.2 Les modules de stockage de déchets C

Cette section expose tout d'abord les objectifs pris en compte dans la conception des alvéoles de stockage de déchets C. Elle présente les différentes solutions envisagées, les principes généraux retenus à ce stade et, à titre de comparaison, les concepts étudiés à l'étranger.

Elle présente ensuite une description de l'alvéole, de la galerie d'accès et de leurs équipements. L'agencement des alvéoles au sein d'un module est également décrit. Les dimensionnements sont justifiés au regard des fonctions à assurer : fonctions de sûreté, fonctions opérationnelles relatives à la mise en place des colis et à la réversibilité. Les fonctions de sûreté consistent notamment à limiter l'endommagement mécanique et l'échauffement de l'argilite et à limiter la circulation d'eau.

Les procédés de construction sont décrits ensuite. Dans l'étude de faisabilité, la conception d'un composant est en effet indissociable de ses procédés de construction. Dans bien des cas, toutefois, plusieurs procédés sont envisageables : la description se focalise sur l'un d'entre eux, qui a paru mieux adapté à ce stade des études.

5.2.1 Exposé des questions principales

Les éléments qui étayent les choix de conception des modules de stockage pour déchets C sont essentiellement liés à la gestion du dégagement thermique des déchets, à la constitution d'un environnement physico-chimique favorable et à la maîtrise des phénomènes hydrauliques.

Il est particulièrement important de dissiper la chaleur dégagée par les déchets afin de limiter l'endommagement de l'argilite et de rester dans un domaine de fonctionnement où les phénomènes sont connus et modélisables.

À ces considérations s'ajoutent des exigences liées au fractionnement et à la gestion réversible du stockage.

5.2.1.1 Gestion du dégagement thermique des déchets

Le dégagement thermique des déchets est dû aux désintégrations radioactives. Il diminue dans le temps, suivant la période radioactive des isotopes qui en sont la cause.

Un premier critère se rapporte à la maîtrise des phénomènes intervenant dans le stockage. Il conduit à limiter la température dans l'alvéole et l'argilite à moins de 100 °C. Au-delà de cette température, les phénomènes et leurs couplages sont plus complexes. Leur compréhension n'est pas pleinement acquise aujourd'hui. En particulier, il ne serait plus possible de démontrer l'absence d'endommagement à court terme de l'argilite. Pour les calculs de dimensionnement thermique, on a retenu une température maximale de 90 °C en paroi d'alvéole (au contact de l'argilite).

Un second critère vise à éviter des transformations minéralogiques des argilites sous l'effet de la charge thermique s'appliquant dans la durée. Les connaissances acquises sur la base d'expérimentations indiquent que les processus de transformation minéralogique les plus importants, au regard des propriétés hydrodynamiques, hydromécaniques et de rétention, concernent les smectites [37]. Les expérimentations réalisées sur ce thème montrent que les smectites ne subissent des transformations que lorsqu'une énergie importante leur est fournie (associant la durée de la période thermique et la température atteinte). En outre, l'expérimentation sur des smectites potassiques (plus réactives que celles associées aux argilites du Callovo-Oxfordien) conduit à estimer que moins de 50 % des smectites seraient transformées en étant soumises à une température de 80 °C pendant une durée de 10 000 ans. Il résulte de ces expérimentations qu'une sollicitation thermique de 70 °C sur 10 000 ans n'induirait que des transformations irréversibles très limitées aux argilites du Callovo-Oxfordien. On cherche donc à repasser sous la valeur de 70 °C bien avant 10 000 ans. De manière prudente, il a été vérifié que la température descend en dessous du seuil de 70 °C au-delà de 1 000 ans.

5.2.1.2 Maîtrise du relâchement des radionucléides, grâce à un environnement physico-chimique favorable aux colis

Le colis de stockage de déchets C comprend un surconteneur qui protège le colis primaire ; il prévient le retour de l'eau sur le verre tant que la température au sein de ce dernier n'est pas redevenue inférieure à 50 °C environ. Aucun relâchement de radionucléides ne se produit tant que le surconteneur reste étanche.

Après la dégradation du surconteneur, la limitation du relâchement des radionucléides revient à limiter la vitesse de dissolution du verre. Cette limitation s'obtient par des conditions d'environnement favorables.

- **Contribution à la maîtrise de la corrosion du surconteneur**

Il convient d'abord de limiter les risques de corrosion localisée ou galvanique du surconteneur à l'interface avec l'alvéole.

● **Limitation de l'altération aqueuse du verre**

Après la dégradation du surconteneur, il convient d'assurer des conditions d'environnement pour lesquelles la vitesse de dissolution du verre est faible. À cette fin, le pH doit rester compris de préférence entre 7 et 9 (ce qui contraint le choix des matériaux dans l'alvéole). Le verre doit être maintenu en équilibre chimique avec l'eau à son contact ; la dissolution de la silice vitrifiée est en effet minimale si l'eau au contact du verre est saturée en silice [9].

À l'arrivée de l'eau sur le verre, cette eau n'est pas saturée en silice ; la dissolution du verre s'effectue alors à une vitesse dite vitesse initiale, V_0 . Elle conduit à la saturation en silice de l'eau au contact du verre. La vitesse de dissolution diminue alors progressivement, $V(t)$, pour s'établir à une vitesse résiduelle, V_r . Cette dernière, déterminée expérimentalement, est inférieure à V_0 de plusieurs ordres de grandeur.

Ces conditions conduisent à rechercher, par conception, l'absence d'écoulement et de transport convectif dans l'alvéole (ce point est examiné ci-après) et à disposer à proximité immédiate des colis d'un milieu où le transport soit lui-même limité. À cet égard, l'argilite doit être préservée au mieux de l'endommagement.

Le besoin de maîtriser l'endommagement s'applique dès la phase de construction de l'alvéole. Il doit se maintenir dans les phases ultérieures. Des déformations convergentes de l'argilite peuvent se produire, par fluage, en liaison avec la résorption des vides internes à l'alvéole : la réduction des vides internes permet de limiter ces déformations. On notera que l'expansion de produits de corrosion peut conduire à des déformations en sens inverse.

5.2.1.3 Maîtrise de la circulation d'eau et du transport des radionucléides

La circulation de l'eau constitue un facteur d'agression des matériaux, notamment des colis. Elle favorise ensuite la migration des espèces relâchées.

Les écoulements dans l'alvéole s'organisent différemment, selon que le reste du stockage est en cours de resaturation ou que sa resaturation est achevée. Ces deux périodes doivent donc être examinées.

La corrosion de l'acier en conditions anoxiques produit de l'hydrogène. Ce processus influe sur la phase de resaturation. Le devenir des gaz dans l'alvéole et leur évacuation au dehors sont également abordés.

● **Limitation de la circulation d'eau dans les alvéoles et les modules, en général**

Les modules doivent contribuer à limiter les circulations d'eau dans les alvéoles. Une disposition où les alvéoles sont en cul de sac est à cet égard bénéfique. En effet, dans une telle configuration, l'alvéole n'est le siège d'aucune différence de charge hydraulique. De ce fait, le seul phénomène qui affecte les alvéoles de stockage résulte de l'interception par ces dernières des flux verticaux qui traversent la formation du Callovo-Oxfordien (du fait des différences de charges entre le Dogger et l'Oxfordien). Ce flux naturel désigné par le terme « flux de drainage » est par ailleurs limité par la faible perméabilité de la formation.

Après resaturation, les scellements de puits complètent le dispositif en limitant la part du flux intercepté qui s'évacue vers les galeries d'accès. Le flux de drainage reste ainsi à son niveau naturel. Ceci limite les possibilités de transport dans les galeries de substances relâchées.

Cette limitation doit être maintenue au mieux, dans les différents cas possibles de situations altérées (défaillance des scellements de puits, intrusion...). À cette fin, une fermeture hydraulique des modules et des alvéoles doit être réalisée : elle consiste en des scellements dont la conductivité hydraulique doit être la plus faible possible.

● **Cas particulier de la période de resaturation**

Au cours de la resaturation d'un ouvrage, les écoulements dans l'argilite sont convergents vers cet ouvrage. Si les durées de resaturation d'ouvrages adjacents diffèrent, elles peuvent induire des transferts d'eau d'un ouvrage à l'autre. Dans la situation où les alvéoles parviennent à saturation les premières, des écoulements peuvent s'établir vers la galerie d'accès encore insaturée ; ils sont susceptibles d'y transporter des radionucléides qui auraient été relâchés par les colis.

Le concept de stockage présenté ici comporte plusieurs facteurs contribuant à limiter les possibilités de transport convectif dans l'alvéole : fermeture hydraulique de l'alvéole, dimensions d'alvéole limitant le flux d'eau intercepté, élongation limitant la vitesse axiale de l'eau pour un flux intercepté donné.

● **Production et devenir des gaz (hydrogène de corrosion) dans les alvéoles C**

Lorsqu'elle est décidée dans le cadre d'une gestion réversible, la fermeture des ouvrages provoque leur resaturation progressive par les eaux des argilites et celle de la roche à leur pourtour s'il y a eu désaturation pendant la phase d'exploitation. Compte tenu de la faible perméabilité des argilites, c'est un processus lent. Il s'accompagne de la production d'hydrogène issu de la corrosion des composants métalliques, qui retarde le retour à la saturation complète.

Les très faibles vitesses de corrosion (quelques micromètres/an, voire probablement quelques dixièmes de micromètre/an) conduisent à une durée de quelques milliers d'années (de l'ordre de 5 000 ans) pour la principale phase de production d'hydrogène. Les modélisations réalisées sur la base des travaux expérimentaux sur échantillons et en forage ont permis d'apprécier les propriétés de transfert de l'hydrogène dans les argilites. Elles montrent que le transfert de gaz s'effectue d'abord par dissolution, puis par diffusion au travers du Callovo-Oxfordien. Lorsque l'eau est saturée en hydrogène, celui-ci migre par écoulement biphasique de façon privilégiée au travers des zones qui présentent les plus faibles pressions d'entrée de gaz (voisines de 2 à 3 MPa pour l'EDZ initiale, à comparer aux 5 à 7 MPa pour les argilites saines). Si la production de gaz est plus rapide que sa migration, celui-ci s'exprime sous forme gazeuse et la pression de gaz peut atteindre le seuil d'ouverture de la porosité des argilites (microfissuration) ou des composants ouvragés en argile gonflante (bouchons d'alvéoles). L'ouverture de microfissures permet au gaz de s'écouler et à la pression de retomber le cas échéant. On a constaté sur échantillons et lors d'un essai en forage que les microfissures se referment après passage du gaz sans altérer les propriétés de la roche (la perméabilité à l'eau de l'argilite reste inchangée) ([62] et [6] - Tome 2). Enfin, lorsque la pression a suffisamment décaissé pour ne plus permettre au gaz d'entrer dans la porosité des différents constituants, il s'évacue lentement par diffusion sous forme dissoute. Cette évacuation est lente en raison de sa faible solubilité dans l'eau et des faibles coefficients de diffusion.

5.2.1.4 Fractionnement

La conception des zones de stockage de déchets C prend en compte un fractionnement en une dizaine de sous-ensembles, pour limiter les conséquences d'une situation altérée (par défaillance ou intrusion). Ces sous-ensembles sont isolés les uns des autres par des scellements établis sur leurs galeries d'accès.

Le scellement de chaque alvéole contribue aussi à limiter l'impact de telles situations altérées.

5.2.1.5 Prise en compte de la réversibilité

La réversibilité vise à conserver la souplesse de gestion des colis de stockage, des alvéoles et des modules. Au début du processus de stockage, cette souplesse est comparable à celle d'un entreposage ; les colis peuvent être retirés simplement, sur une période de durée a minima séculaire (quelques siècles).

La possibilité de retirer les colis repose sur la durabilité des colis, des alvéoles, et des galeries d'accès. Cela recouvre l'intégrité des colis de stockage, des composants de l'alvéole qui les contiennent, ainsi que le maintien, autour des colis, d'un jeu fonctionnel minimal permettant leur retrait sur les mêmes durées séculaires. L'intégrité de ces divers éléments sur une durée a minima séculaire suppose un

dimensionnement mécanique qui tienne compte de l'évolution des matériaux, et notamment, dans le cas des alvéoles C, de la corrosion des parties métalliques. De même, le maintien des galeries d'accès suppose un dimensionnement mécanique des revêtements en béton sur une durée identique.

Enfin, la modularité de la zone de stockage des déchets C lui confère une souplesse de gestion d'ensemble.

5.2.2 Principes de conception retenus

5.2.2.1 Plusieurs solutions envisagées

Les options envisagées partagent un certain nombre de caractères ou de principes communs. Elles se distinguent par des différences de taille ou de disposition des cavités de stockage, de matériaux employés, de modes de mise en place.

● **Des principes communs**

L'importance de la maîtrise du dégagement thermique, vis-à-vis de l'endommagement de l'argilite, a été soulignée dans l'exposé des questions principales. Un principe général de conception du stockage est de bâtir sa sûreté à long terme sur son évolution passive (sans intervention humaine). Après fermeture, la chaleur produite par les colis se dissipe par conduction dans le milieu géologique. La ventilation n'est pas mobilisée, en phase d'exploitation, pour dissiper la chaleur. Ce choix de principe permet de dissocier les décisions de fermeture des dispositions de gestion de la phase thermique.

Toutes les solutions d'alvéoles qui ont été considérées sont borgnes. Cette disposition permet de minimiser la circulation d'eau après fermeture, même en situations altérées.

Limiter la migration des substances relâchées demande de préserver des gardes d'argilite non perturbées autour du stockage. Cet objectif conduit à placer les alvéoles et leurs galeries d'accès en position médiane de la formation d'argilites. La géométrie de la formation conduit à envisager une emprise d'extension principalement horizontale et de faible épaisseur. Sur cette base ont été examinées des solutions d'alvéoles verticales (puits) ou horizontales (tunnels).

Enfin, l'immobilisation des radionucléides dans le stockage conduit à maîtriser les conditions d'écoulement et de transport à proximité immédiate des colis. Cet objectif implique de limiter l'endommagement de l'argilite en champ proche.

● **Alvéoles horizontales ou verticales**

Des alvéoles horizontales conduisent à un moindre impact sur la formation géologique, en termes de volume excavé et d'emprise du stockage. En effet, les architectures en tunnels conduisent à des volumes excavés significativement inférieurs à celles en puits. Le gain provient du linéaire de galeries d'accès. En effet, une galerie d'accès peut desservir deux rangées d'alvéoles horizontales situées de part et d'autre alors qu'elle ne peut desservir qu'une seule rangée d'alvéoles verticales. Un même linéaire de galerie d'accès dessert ainsi deux fois plus d'alvéoles horizontales que de puits verticaux. La Figure 5.2.1 illustre cet aspect. La disposition horizontale permet en outre de maximiser l'épaisseur des gardes d'argilite non perturbée.

Le recours à des alvéoles horizontales ouvre des voies d'optimisation. En effet, à linéaire cumulé d'alvéoles constant (c'est-à-dire pour une même capacité de stockage), l'augmentation de la longueur unitaire des alvéoles permet d'en réduire le nombre et, par voie de conséquence, de réduire le linéaire de galeries d'accès. Dans la formation argileuse étudiée, cette voie d'optimisation n'est possible que dans la configuration horizontale car la préservation de gardes d'argilites limite l'extension verticale des alvéoles et exclut, de ce fait, les puits de grande profondeur.

La manutention des colis apparaît a priori plus complexe en configuration horizontale qu'en configuration verticale. Cependant, la section 9, relative aux moyens d'exploitation, montre à cet égard la faisabilité du procédé de mise en stockage des colis en configuration horizontale. Cet

inconvenient relatif ne l'emporte pas sur les avantages présentés sur les autres critères, notamment ceux qui relèvent de la performance de confinement du stockage.

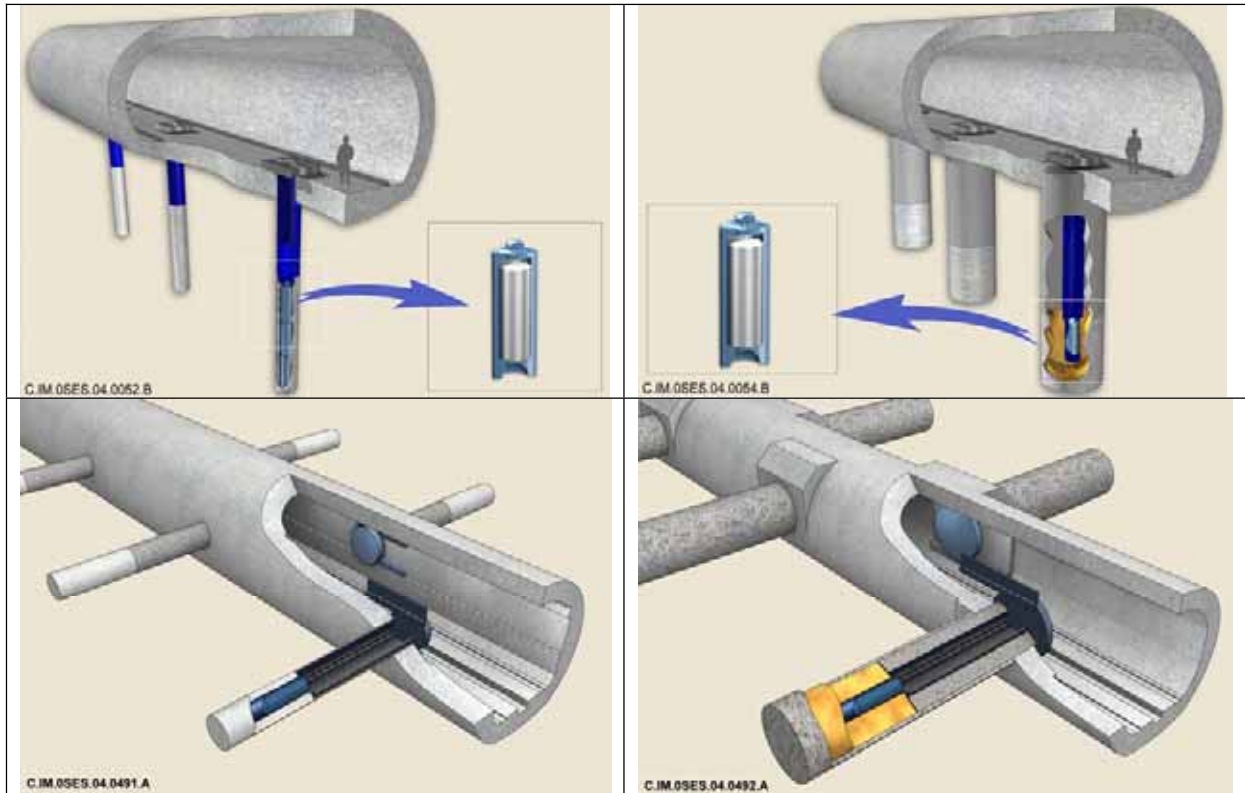


Figure 5.2.1 Concepts d'alvéole pour les déchets C (puits ou tunnels, avec ou sans barrière ouvragée argileuse)

- **Galerie de stockage ou alvéole de stockage**

Le terme « galerie de stockage » désigne un ouvrage dont le diamètre utile est significativement supérieur à celui du colis de stockage ; l'espace restant est utilisable pour la circulation d'engins de manutention et la ventilation de l'ouvrage. L'alvéole de stockage se caractérise au contraire par un diamètre étroitement adapté à celui du colis de stockage. Le concept d'alvéole de stockage est illustré par la Figure 5.2.1. Le concept de galerie de stockage est illustré par la Figure 5.3.1, appliqué au cas des combustibles usés.

La galerie de stockage peut permettre un accès direct à chaque colis, en phase d'exploitation et d'observation ; aucun avantage ne s'y attache après fermeture. Elle se pénalise par le volume excavé très important de ces cavités. La ventilation de ces galeries pourrait permettre un gain en densité de stockage. Toutefois, il ne compenserait pas l'augmentation des volumes excavés ; au contraire, le réseau de ventilation plus complexe nécessiterait des galeries d'accès supplémentaires. D'autre part, l'utilisation à cette fin de la ventilation ne respecte pas le principe d'une dissipation purement passive de l'énergie thermique des colis (par conduction pure).

En conséquence, seule la configuration « alvéole de stockage » est envisagée au stade des études de faisabilité.

- **Alvéole avec ou sans corps de barrière ouvragée**

Un concept avec barrière ouvragée en argile gonflante apporte une faible perméabilité autour des colis, favorable à la maîtrise des conditions d'environnement du verre, vis-à-vis de sa cinétique de dissolution. Cette faible perméabilité, à l'échelle du matériau, se conserve bien à long terme à l'échelle de l'ouvrage, grâce à la déformabilité de l'argile gonflante et à sa capacité de gonflement.

Un concept sans corps de barrière ouvragée présente des avantages importants au regard de la simplicité et de la compacité du stockage. L'absence de barrière ouvragée limite le diamètre de l'excavation et facilite la construction, ce qui perturbe moins la roche. L'espacement entre alvéoles étant avant tout dicté par des considérations thermiques, le recours à une barrière ouvragée est de nature à augmenter la distance entre alvéoles du fait de l'introduction de jeux supplémentaires ou de matériaux thermiquement moins conducteurs (barrière ouvragée partiellement saturée lors de sa mise en place). Il en résulte une plus grande emprise du stockage.

L'analyse des deux options a conduit l'Andra à privilégier une solution sans barrière ouvragée pour les alvéoles de déchets C. Une telle configuration est rendue possible par la faible zone endommagée attendue autour des alvéoles, du fait de leur petit diamètre, des propriétés géotechniques de la roche et de la méthode de creusement envisagée. En effet, les études ont montré :

- l'absence de formation de zone fracturée autour de l'alvéole à 500 m de profondeur lors de la construction de l'alvéole ;
- la création d'une zone microfissurée de faible extension, dont la perméabilité ne modifie pas les conditions de transport diffusives dans le champ proche autour de l'alvéole ;
- une évolution à long terme de nature à refermer la microfissuration autour de l'alvéole (phénomènes de fluage sur appui et de colmatage).

Les incertitudes relatives aux caractéristiques géotechniques, aux modèles rhéologiques, ou encore à l'évolution sur le long terme avant la mise en appui, peuvent conduire à une zone fracturée autour de l'alvéole. Cependant, celle-ci serait en tout état de cause limitée à une très faible épaisseur d'argilite (quelques centimètres) et ne justifierait pas l'adoption d'une barrière ouvragée. Une variante d'alvéole avec barrière ouvragée serait similaire dans son principe à l'alvéole de stockage de combustibles usés (voir section 5.3).

5.2.2.2 La solution retenue

Le concept de référence considéré à ce stade pour les déchets C est un tunnel horizontal, borgne, sans barrière ouvragée argileuse. Ce tunnel est d'environ 700 mm de diamètre ; il est revêtu d'un chemisage métallique. La longueur des alvéoles a été limitée, à ce stade des études, pour faciliter la démonstration de faisabilité technologique.

Le travail de conception a porté notamment sur les aspects suivants : la détermination de l'espacement des colis et des alvéoles, pour des raisons thermiques ; la maîtrise de l'endommagement de l'argilite par la limitation des vides dans l'alvéole ; le scellement de l'alvéole et les dispositions qui en résultent pour la tête d'alvéole.

L'alvéole comporte une « partie utile » destinée au stockage des colis, et une tête d'alvéole destinée au scellement de l'alvéole. La chaleur produite par les déchets est évacuée uniquement par conduction passive dans la formation géologique ; aucune ventilation n'est sollicitée pour ce processus. Pour respecter les critères de température énoncés plus haut, certains colis ne pourraient être stockés côte à côte qu'après un temps d'entreposage très long. Il est possible de stocker plus tôt ces colis à condition de les espacer de façon à réduire le flux thermique moyen. Une solution consiste à disposer des intercalaires inertes entre les colis, dont la longueur est ajustée en fonction de la puissance thermique des colis considérés.

À l'issue de la mise en place des colis, la tête d'alvéole est scellée par un noyau d'argile gonflante. Ce noyau gonflant est confiné mécaniquement par un bouchon de béton.

Les alvéoles de stockage sont disposées de part et d'autre d'une galerie d'accès qui les dessert. Elles sont espacées les unes des autres de 8 à 13 mètres, selon la puissance thermique dégagée par les déchets.

Les schémas de la Figure 5.2.2 illustrent cette conception.

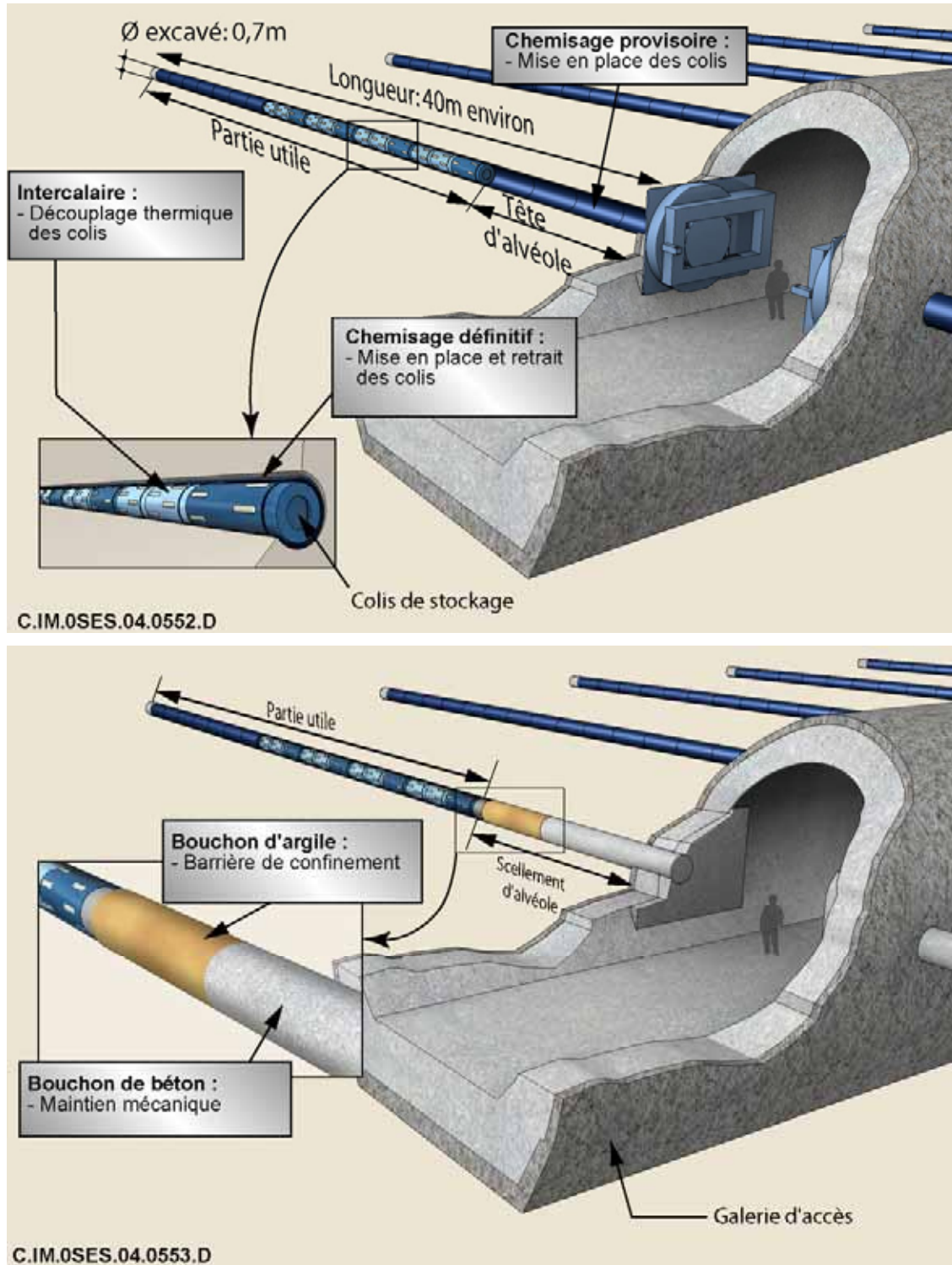


Figure 5.2.2 Alvéole de stockage de déchets C : principaux composants et fonctions associées (en haut, alvéole en exploitation, en bas, alvéole scellée)

● **Orientation des alvéoles et architecture de la zone de stockage**

Les alvéoles sont orientées parallèlement à la contrainte horizontale majeure. Cette configuration se traduit par un champ de contraintes isotropes dans un plan perpendiculaire au grand axe de l'alvéole et contribue donc à la minimisation des perturbations mécaniques dans la roche autour de l'alvéole (pas de création de zone fracturée autour de l'alvéole pour une profondeur de 500 m).

Les alvéoles de stockage sont regroupées en modules. Un module de stockage est constitué de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'alvéoles (en fonction du type de déchet) desservies par trois galeries d'accès parallèles et connectées entre elles (voir Figure 5.2.17).

● **Le chemisage**

L'alvéole est dotée d'un chemisage métallique, en acier peu allié. Cette solution a été considérée au regard de trois besoins essentiels : le chemisage soutient mécaniquement l'alvéole pour la mise en place des colis ; il favorise la réversibilité par le maintien durable des jeux fonctionnels internes pendant une durée séculaire à pluriséculaire ; il est compatible, au plan chimique, avec les colis de stockage.

Le chemisage est constitué de deux parties : un chemisage définitif est placé dans la partie utile où sont stockés les colis ; un chemisage provisoire est placé en tête d'alvéole ; il est retiré pour le scellement de l'alvéole.

● **Le bouchon**

Les alvéoles sont scellées par un bouchon d'argile gonflante mis en place dans la tête d'alvéole. Ce bouchon constitue avec l'argilite un milieu continu de faible perméabilité : il assure ainsi une fermeture hydraulique et physico-chimique de l'alvéole.

Le bouchon d'argile est situé en dehors de la zone endommagée de la galerie d'accès. Il est mécaniquement confiné par un massif d'appui en béton qui limite l'expansion volumétrique de l'argile pendant sa resaturation. Une longueur de 3 m a été considérée pour le bouchon d'argile gonflante. Cette longueur a été choisie pour des raisons de robustesse : élançement supérieur à un et relaxation compatible avec le maintien d'une pression de gonflement minimale (ce point est examiné en détail au § 5.2.6.2). Elle est suffisante au regard de l'extension de la perturbation alcaline engendrée par le béton voisin (du massif d'appui et du revêtement de la galerie) : l'étude de la propagation de la perturbation alcaline a conduit à estimer cette extension dans le bouchon d'argile, à environ 0,6 m à 100 000 ans et 1,8 m à un million d'années.

● **Les intercalaires**

À l'intérieur de l'alvéole, les colis de stockage C1 à C4 sont séparés par des intercalaires. Un intercalaire est constitué d'une enveloppe métallique enfermant un matériau chimiquement compatible avec les déchets vitrifiés (fritte de verre, silice ...).

La présence des intercalaires crée un découplage thermique des colis les uns par rapport aux autres. Elle réduit le flux thermique surfacique moyen qui s'applique sur le chemisage et évite les pics de température au droit des colis grâce à une meilleure homogénéisation thermique. Cette disposition permet d'augmenter le nombre de colis par alvéole sans augmenter la valeur du pic thermique. Elle permet donc de diminuer le nombre d'alvéoles de stockage, en les allongeant (par rapport à une configuration où les colis seraient stockés bout à bout dans des alvéoles courtes). Elle conduit ainsi à un gain de compacité du stockage.

Dans le cas des déchets type C0, les intercalaires ne sont pas nécessaires compte tenu de leur puissance thermique modérée.

● **Bilan des besoins et des solutions retenues**

Les différents composants de l'alvéole décrits ci-dessus et leurs fonctions associées sont synthétisées par le Tableau 5.2.1 [7] [22].

Tableau 5.2.1 Fonctions et principaux composants de l'alvéole et du module de déchets C

Fonctions	Période	Chemisage métallique	Bouchon et operculaire métalliques	Bouchon d'alvéole	Intercalaires	Scellement de module	Remblai de la galerie d'accès
Transférer les colis jusqu'à leur emplacement de stockage	Exploitation	X					
Soutenir mécaniquement les ouvrages	Exploitation et observation	X					
Protéger les personnes contre l'irradiation	Exploitation et observation		X	x			
Permettre de récupérer les colis de stockage	Exploitation et observation	X	x				
S'opposer à la circulation d'eau	Après fermeture			x		X	
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Après fermeture	x		X			
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Après fermeture			x			
Limiter les déformations mécaniques dans les argilites du Callovo-Oxfordien	Après fermeture	x		x	x	x	X
Dissiper la chaleur	Toutes	x			X		
Fractionner le stockage	Après fermeture					X	

Légende : **X** composant essentiel dans la réalisation d'une fonction
 x contribution d'un composant à une fonction

5.2.2.3 Les solutions adoptées à l'étranger

Plusieurs pays étudient des solutions de stockage souterrain pour des déchets similaires aux déchets français de catégorie C.

En Belgique, l'ONDRAF étudie des concepts de stockage dans une argile plastique (l'argile de Boom), à environ 200 m de profondeur.

Le dossier SAFIR 2 (2001) [63] présente un concept dans lequel les colis de stockage sont introduits dans un chemisage en inox centré dans l'alvéole. L'alvéole est une galerie circulaire de 2,4 m de diamètre (voir Figure 5.2.3). Les colis y sont entourés d'une barrière ouvragée argileuse d'environ 80 cm d'épaisseur ; elle est constituée de blocs préfabriqués d'argile gonflante mélangée à du sable et du graphite. Un revêtement en béton d'environ 25 cm d'épaisseur assure le soutènement du terrain. Les galeries accueillant les colis sont passantes ou aveugles (voir Figure 5.2.4). La mise en place des colis nécessite de les translater sur environ 200 m dans le chemisage en inox.

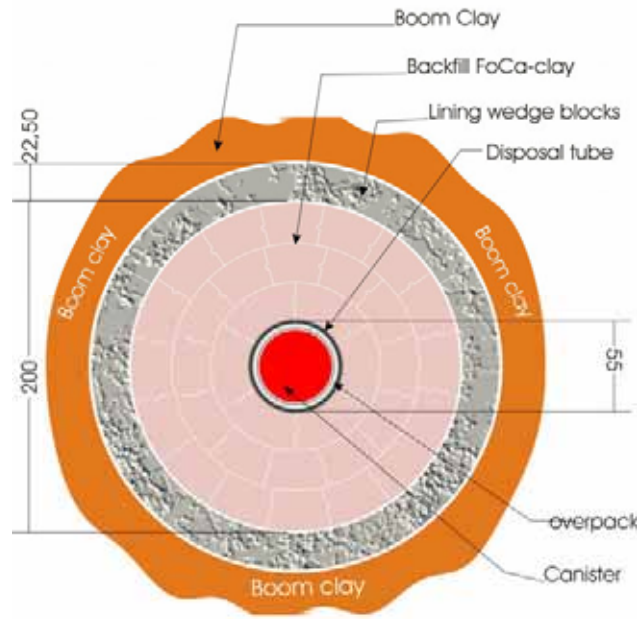


Figure 5.2.3 Concept de l'ONDRAF pour le stockage des colis C, coupe transversale d'après SAFIR 2

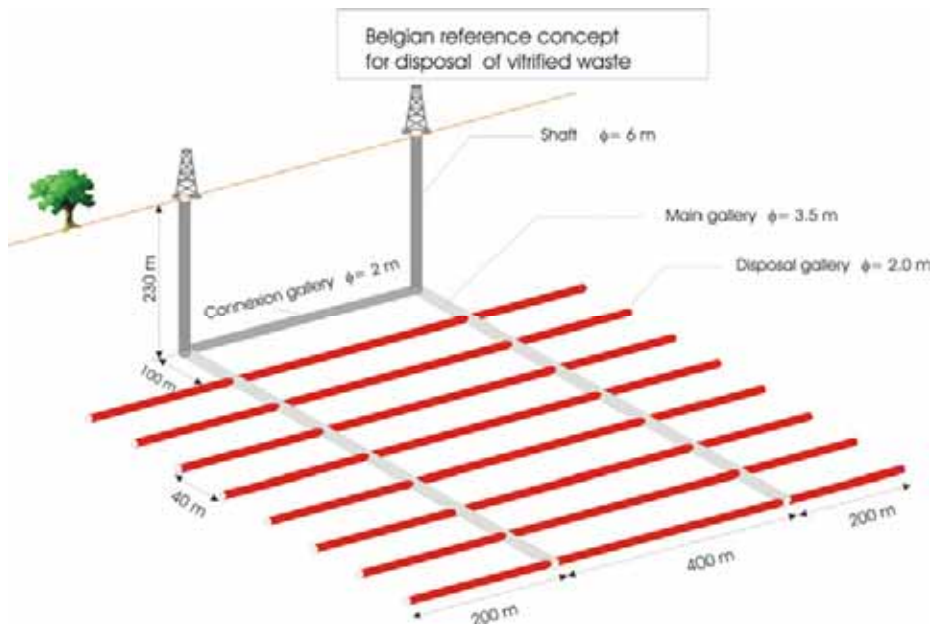


Figure 5.2.4 Concept de l'ONDRAF pour le stockage des colis C, architecture générale d'après SAFIR 2

Des concepts alternatifs ont été récemment envisagés par l'ONDRAF [64]. Dans ces concepts, les colis primaires, regroupés par deux dans un même surconteneur, (super conteneur) sont stockés dans des alvéoles horizontales ou des puits verticaux avec ou sans barrière ouvragée.

Au Japon, deux milieux géologiques sont considérés de manière générique : le granite et l'argile. Le rapport H12 (1999) [51] présente un concept dans lequel le colis primaire (CSD-V) est protégé par un surconteneur en acier peu allié. Les colis sont stockés dans des alvéoles horizontales ou verticales d'environ 2,20 m de diamètre. Une barrière ouvragée constituée de blocs préfabriqués d'argile gonflante (avec 30 % de sable) est interposée entre le colis de stockage et le terrain (voir Figure 5.2.5).

L'épaisseur de la barrière ouvragée varie en fonction de la géologie considérée et de la résistance allouée au surconteneur. Cette épaisseur reste toutefois dans une gamme de 30 à 70 cm.

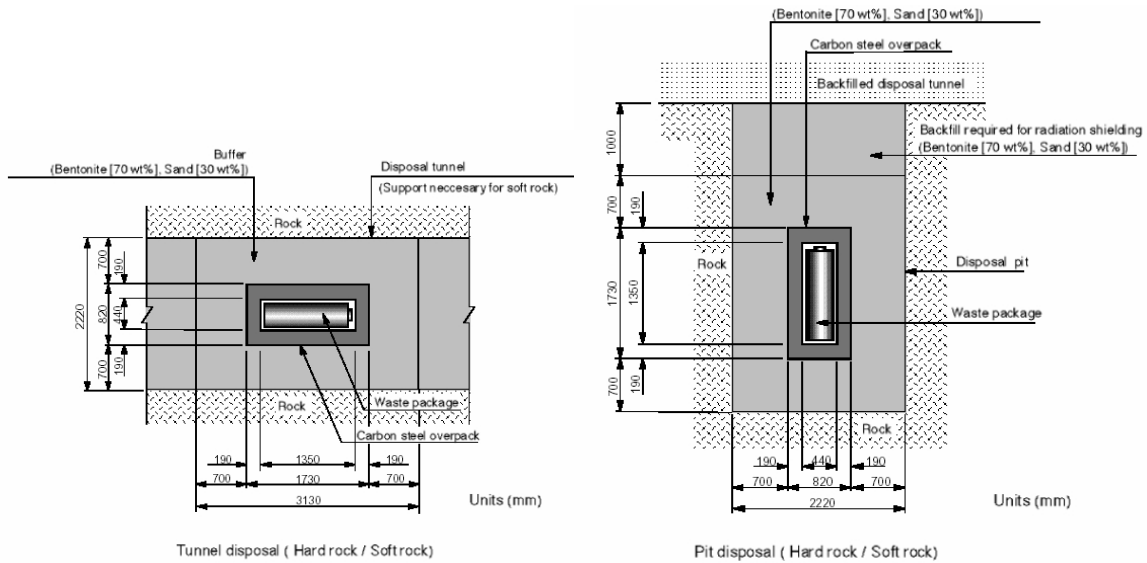


Figure 5.2.5 Concepts JNC (Japon) pour le stockage des colis C, d'après le rapport H12

En Suisse, la Nagra, dans le rapport « Project Opalinus Clay » [44], présente des concepts de stockage dans une argile relativement raide située à moins de 600 m de profondeur.

Les colis de stockage sont déposés sur des plots en argile gonflante compactée, dans une galerie de stockage revêtue (voir Figure 5.2.6). La distance séparant deux colis adjacents est d'environ 3 m. Les vides entre les colis et autour des colis sont ensuite comblés par de l'argile gonflante pulvérulente, faiblement compactée en place.

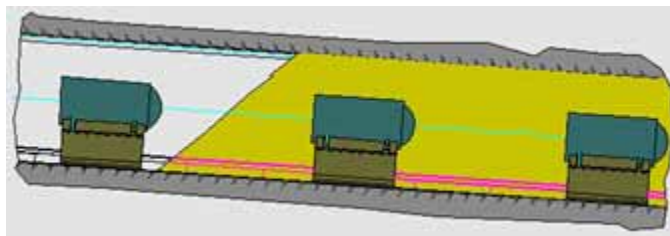


Figure 5.2.6 Concept Nagra (Suisse) pour le stockage des colis C

Les trois exemples présentés ci-dessus mettent en évidence des similitudes avec le concept de l'Andra. Les concepts étrangers adoptent en général le principe de surconteneurs. Les alvéoles sont le plus souvent horizontales. D'autre part, dans presque tous les cas, les colis sont espacés les uns des autres pour des raisons thermiques.

5.2.3 Description et dimensionnement de l'alvéole et de la galerie d'accès en phase d'exploitation

La présente section est dédiée à la description des ouvrages en configuration d'exploitation. La description de la configuration « alvéole scellée » est fournie à la section 5.2.6. Les principales caractéristiques de l'alvéole et de sa galerie d'accès associée sont présentées sur la Figure 5.2.7. La Figure 5.2.8 présente de façon plus détaillée les divers composants décrits ci après [65].

5.2.3.1 Description de l'alvéole en configuration d'exploitation

- Description de l'équipement de la partie utile de l'alvéole

La partie utile de l'alvéole est constituée d'un chemisage métallique définitif en acier. Le recours à l'acier se justifie par sa résistance mécanique et la facilité qu'il offre aux manutentions des colis dans l'alvéole. Le chemisage est au contact du terrain. Le choix de la nuance d'acier, au stade de l'étude de faisabilité, vise à minimiser les effets de corrosion galvanique ; les études ont ainsi été menées sur un acier faiblement allié de nuance identique ou voisine de celle du surconteneur des colis.

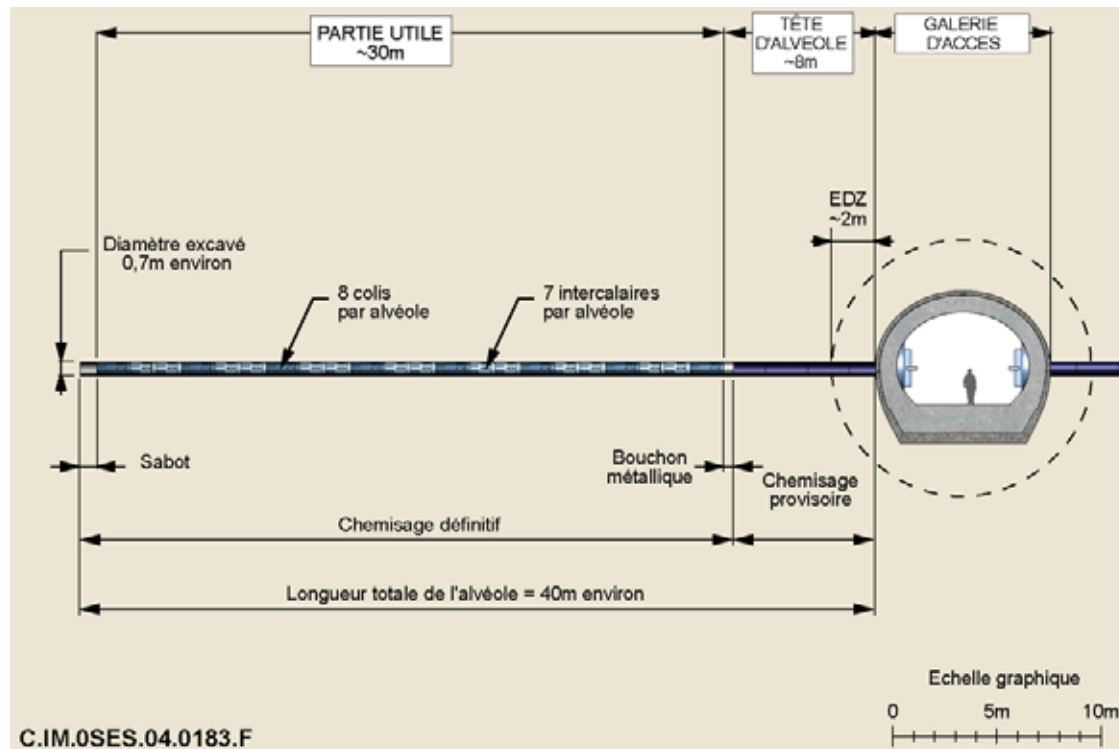


Figure 5.2.7 Coupe longitudinale générale de l'alvéole C

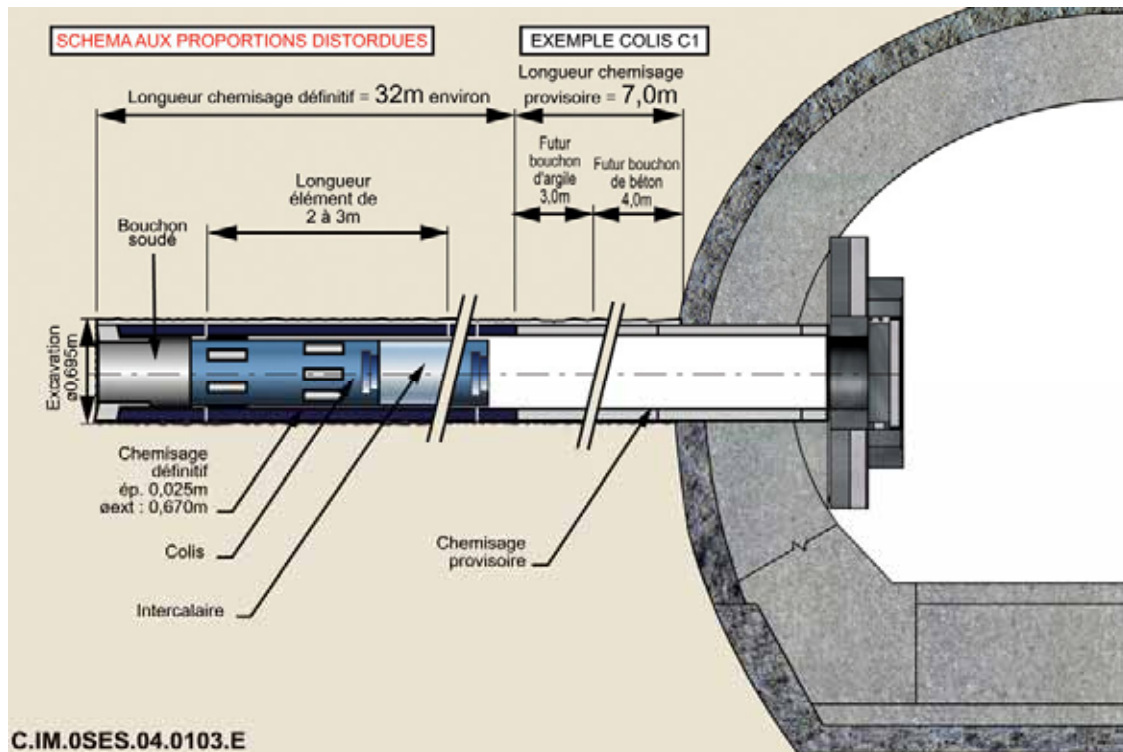


Figure 5.2.8 Coupe longitudinale détaillée de l'alvéole C (proportions distordues)

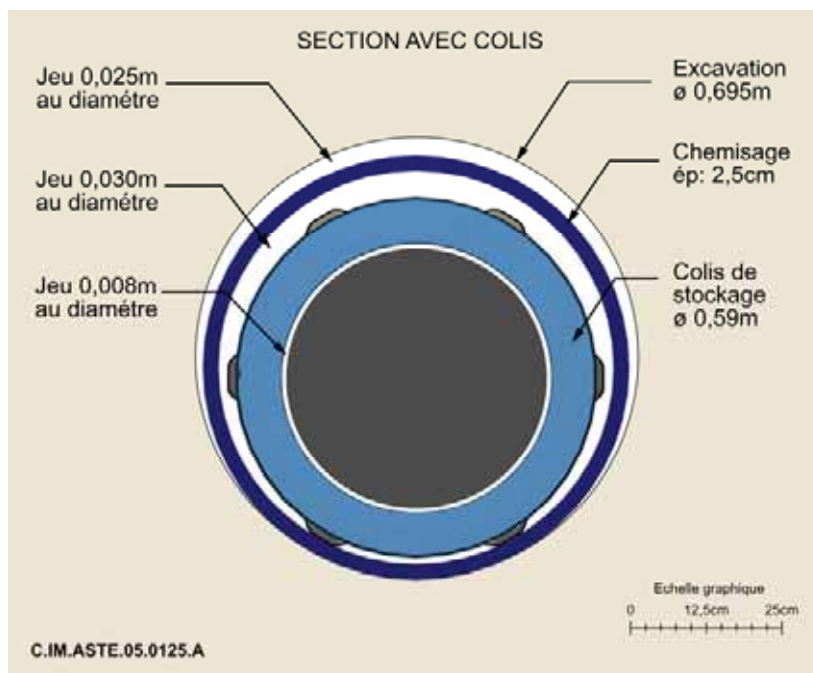


Figure 5.2.9 Section transversale de l'alvéole pour colis types C1 à C4

L'épaisseur du chemisage doit permettre la tenue mécanique de l'alvéole et reprendre la poussée sur l'outil lors du creusement (voir § 5.2.5). Les calculs de résistance ont conduit à un prédimensionnement de 25 mm d'épaisseur.

Un espace annulaire minimal est requis entre le chemisage et le terrain. La valeur maximale, de l'ordre du centimètre au rayon, correspond à la recommandation prudente d'entreprises de génie civil et minier, et intègre une marge pour éviter le coincement lors du creusement. Cet espace annulaire devra être ajusté en fonction des conditions observées (des tests in situ seront nécessaires). À terme, cet

espace annulaire, quelle que soit sa valeur initiale, se refermera par déformation différée (ou fluage) du terrain.

Un jeu fonctionnel, entre colis et chemisage, permet la manutention. Un jeu de quelques centimètres (3 cm au diamètre) est retenu au stade actuel des études ; il est compatible avec une manutention des colis par poussage sur patins.

Le chemisage pourrait être introduit dans l'alvéole par tronçons⁷⁵, d'environ 2,5 à 3 m de longueur. La longueur de ces tronçons doit être la plus grande possible afin de minimiser le nombre de connexions. Une longueur de 3 m est considérée aujourd'hui comme le maximum admissible compte tenu des dimensions de la galerie d'accès.

Les connexions entre les tronçons ne doivent pas présenter des surépaisseurs du chemisage, ni à l'extérieur (pour faciliter l'introduction du chemisage par poussée dans le terrain), ni à l'intérieur (pour faciliter l'introduction des colis dans le chemisage). Des connexions vissées, clampées et soudées constituent des dispositions techniques aujourd'hui disponibles et répondant à cette exigence.

Des intercalaires sont placés entre les colis, lorsque la puissance thermique dégagée l'impose. Un intercalaire est constitué d'une enveloppe métallique, équipée d'organes de manutentions identiques à ceux des colis, et d'une matrice intérieure. La nature de cette matrice intérieure n'est pas définie aujourd'hui : elle doit réaliser un compromis entre une bonne conductivité thermique, une compatibilité chimique et une résistance mécanique.

● Description de l'équipement de la tête de l'alvéole (avant scellement)

Le diamètre et l'épaisseur du chemisage provisoire sont identiques à ceux du chemisage définitif. La connexion entre le chemisage définitif et le chemisage provisoire pourrait être du type emboîtement sans soudure, de manière à faciliter le démontage.

Le bouchon métallique a pour fonction de constituer un écran aux rayonnements β , γ et neutronique produits par les colis. Il est mis en place dans le chemisage définitif après mise en stockage du dernier colis (voir section 5.2.6).

En tête d'alvéole, un operculaire constitué d'un cadre métallique (ou « dormant ») scellé au revêtement de la galerie d'accès et d'une porte guillotine, assure la radioprotection en position fermée et permet l'accostage des dispositifs de manutention des colis pour leur mise en place. L'operculaire a vocation à être en partie récupéré pour être réutilisé sur d'autres alvéoles. Il est alors remplacé par un capot d'étanchéité isolant l'alvéole avant sa fermeture pour limiter les échanges gazeux et instaurer des conditions favorables à la maîtrise de la corrosion au sein de l'alvéole.

5.2.3.2 Description de la galerie d'accès

La galerie d'accès est d'abord définie par les nécessités de la manutention des colis lors de leur mise en place dans l'alvéole.

Sur cette base, on a retenu des hypothèses pénalisantes, en fonction de la connaissance disponible sur le site, pour leur dimensionnement. L'acquisition d'une connaissance plus approfondie, sur ouvrages réels, pourra permettre d'adopter des hypothèses plus favorables.

L'exercice mené montre que ces galeries sont techniquement faisables, même avec les hypothèses pénalisantes considérées. Il conduit à une largeur utile de la galerie d'accès de l'ordre de 6,40 m à mi-hauteur, de 4,50 m au niveau du radier, et à une hauteur utile de 4,50 m. Le soutènement posé au creusement de la galerie se compose de boulons de 4 m de long⁷⁶ et de béton projeté d'une épaisseur de 20 cm. Le revêtement, posé 6 mois à un an après le creusement de la galerie, est constitué de béton (B60) d'une épaisseur d'un mètre environ.

⁷⁵ Le tronçon de fond d'alvéole (le premier introduit dans le terrain) pourrait être doté d'un sabot de type trousse coupante. Ce sabot serait utilisé pour le creusement et laissé en place. Voir section 5.2.5.

⁷⁶ Le schéma de boulonnage pourra être modifié au droit des alvéoles ; en tout état de cause, la taille des boulons restera inférieure à la longueur du bouchon de béton de la zone de scellement.

Des réservations dans le radier permettent les passages de câbles. Le radier est équipé d'une bande de roulement en béton, permettant de faire circuler des engins sur pneumatiques pour la manutention. Suivant le type d'engin de manutention choisi, le radier pourrait également être équipé de rails.

Il n'est pas utile d'armer le revêtement en section courante.

5.2.3.3 Dimensionnement thermique des modules de stockage

Le dimensionnement thermique du module consiste à déterminer, pour une puissance thermique des colis donnée, les géométries qui respectent les critères thermiques (définis à la section 5.2.1.1).

● **Objectifs du dimensionnement thermique**

Le premier objectif du dimensionnement thermique correspond à la recherche de la durée d'entreposage préalable envisageable avant de mettre les déchets en stockage, pour les concepts proposés

Pour cette durée d'entreposage préalable, le deuxième objectif est l'identification de la configuration géométrique des modules de stockage correspondant au volume total excavé le plus faible possible et respectant la valeur limite de température. Cette limite de température est relative à un phénomène ponctuel appelé « pic thermique ». L'agencement des colis dans les alvéoles et des alvéoles dans les modules de stockage est essentiellement subordonné à ce phénomène. On rappelle que la limite de température retenue dans les calculs est de 90 °C au contact de la roche.

● **La modélisation thermique**

Le dimensionnement thermique est réalisé au moyen d'une modélisation aux éléments finis en trois dimensions [10]. Cette modélisation est aussi utilisée pour évaluer la durée de la phase thermique, c'est-à-dire la durée pendant laquelle la température des colis excède une valeur seuil prédéfinie. Ce dernier aspect justifie le dimensionnement du colisage (voir le chapitre 4). La modélisation thermique effectuée donne accès aux grandes échelles de temps et d'espace. Les effets thermiques liés à l'architecture générale (emprise générale des modules et disposition des modules les uns par rapport aux autres, vérification de l'indépendance thermique des zones de stockage) sont présentés dans le chapitre 6.

Données et hypothèses associées à la modélisation

Les colis de stockage C1 à C4 sont fortement exothermiques. Leur puissance diminue de 2 600 watts à 300 watts en 100 ans (cf. chapitre 3). Les colis de stockage C0 sont quant à eux nettement moins exothermiques. Leur puissance au moment de leur mise en conteneur est environ 10 fois moindre que celle des colis C1.

Dans la modélisation, les modes de transfert thermique sont la conduction et le rayonnement. La conduction est modélisée pour l'ensemble des matériaux constituant l'alvéole. Le rayonnement est pris en compte entre toutes les composantes du modèle séparées par des « lames d'air » (jeux fonctionnels, fonds d'alvéole, etc.).

En outre, il a été considéré, de façon simplificatrice, que toutes les alvéoles de la zone de stockage concernée sont chargées simultanément à une même date et que toutes les galeries d'accès sont remblayées après 30 ans. Cela constitue une approche conservatrice, qui néglige l'évacuation d'une partie de la chaleur par la ventilation des galeries en phase d'exploitation.

Enfin, la valeur retenue pour la température initiale de la formation du Callovo-Oxfordien au moment de la mise en stockage est de 22 °C.

Principe de modélisation

La principale difficulté de la modélisation thermique du stockage réside dans la grande disparité des échelles d'espace et de temps.

En termes d'espace il existe en effet un très fort contraste entre les dimensions des composantes des alvéoles (par exemple quelques centimètres pour le jeu fonctionnel entre les colis et le chemisage) et celles de l'ensemble du stockage.

Sur le plan temporel les conditions qui pilotent à court terme le mode d'évacuation de la chaleur produite par les colis sont différentes de celles qui caractérisent le comportement thermique du stockage à plus long terme. En effet, à court terme, les alvéoles sont thermiquement indépendantes les unes des autres. À plus long terme en revanche (à plus de trois cents ans), le réchauffement « global » à l'échelle de la zone de stockage engendre un couplage thermique entre les différentes unités.

Pour répondre à cette problématique, une modélisation tridimensionnelle aux éléments finis a été réalisée sur la base de trois modèles « emboîtés » (ou modélisation « gigogne » - voir Figure 5.2.10). Chacun des trois modèles est caractérisé par un domaine de validité qui lui est propre :

- le modèle global à l'échelle du site ;
- le modèle médian à l'échelle du module de stockage ;
- le modèle local à l'échelle de l'alvéole de stockage.

Le *modèle global* (échelle kilométrique) représente le milieu géologique depuis la surface jusqu'à une profondeur de 3 500 m. Les caractéristiques thermo-physiques des différentes couches géologiques sont prises en compte. Ce modèle d'ensemble permet de calculer l'évolution de température sur une durée de 10 000 ans en de nombreux points situés à plus de 50 m des colis de stockage. Sur une telle durée, la chaleur dégagée par les colis a une incidence sur une distance kilométrique et les différents modules du stockage interagissent thermiquement entre eux. Ce modèle d'ensemble représente donc tous les modules de stockage et il s'étend sur une distance latérale de 2 000 m autour du stockage.

Le *modèle médian* est à l'échelle du module de stockage (échelle métrique). Sa représentation géométrique est moins fine que pour le modèle local, mais elle inclut les ouvrages environnants de l'alvéole (galeries d'accès, scellements, etc.). Le calcul est effectué en appliquant aux bords les conditions aux limites obtenues sur le modèle global.

Le *modèle local* permet de représenter finement les différents composants de l'alvéole avec une bonne précision géométrique (échelle centimétrique). Il permet d'évaluer l'évolution de la température dans l'environnement immédiat de l'alvéole pour tous les types de colis dans le stockage. Il y a autant de modèles locaux que de colis types exothermiques. Ce modèle est utilisé en appliquant aux bords les conditions aux limites obtenues sur le modèle médian précédent. La totalité des composants de l'alvéole, les jeux fonctionnels, les intercalaires et les ouvrages d'accès sont représentés.

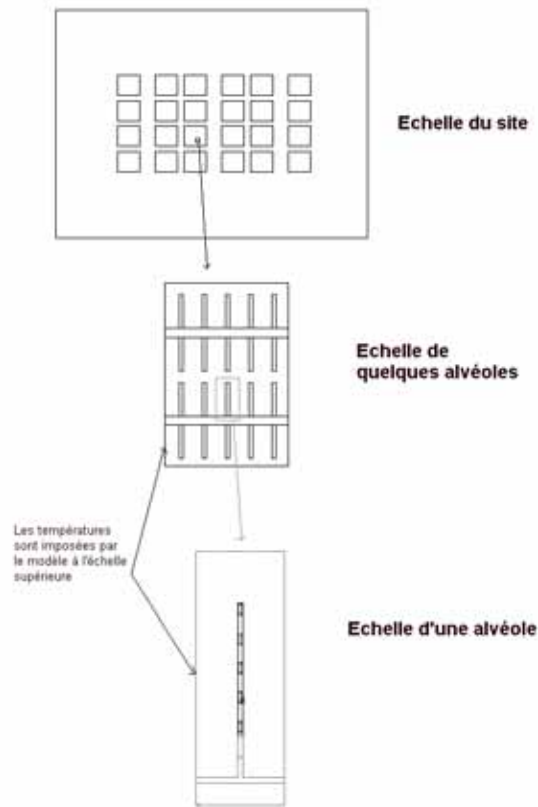


Figure 5.2.10 Principe de la modélisation « gigogne » retenu

Le modèle à l'échelle locale est illustré par la Figure 5.2.11 donnant les isothermes de température lors du pic thermique pour une alvéole de type C1.

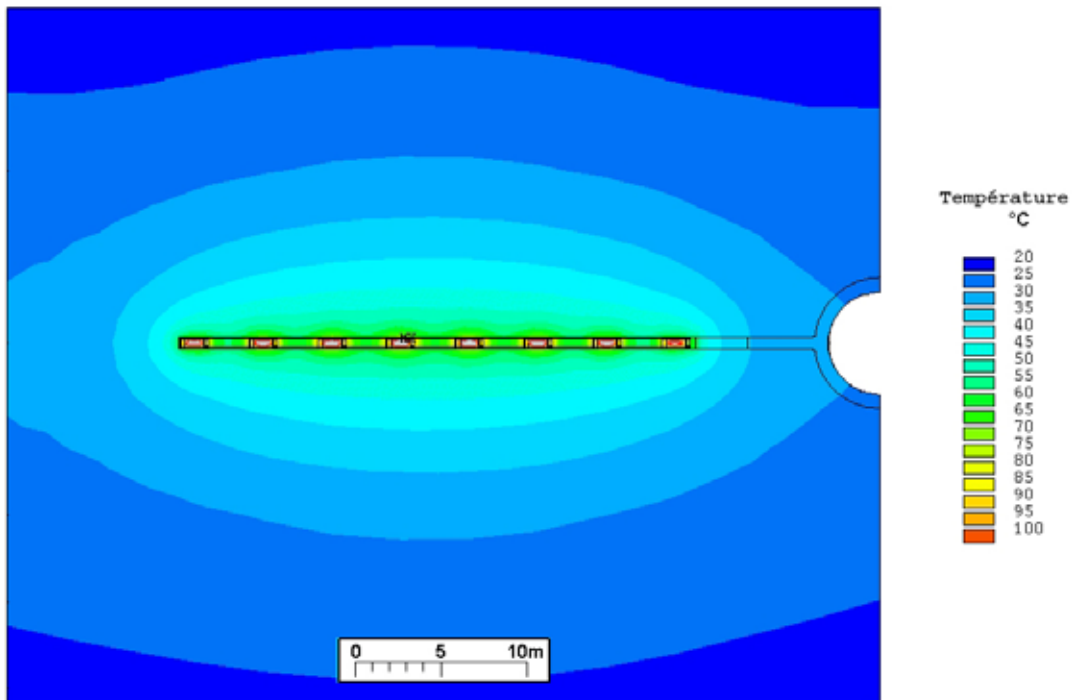


Figure 5.2.11 Isothermes de température autour d'une alvéole C1, au moment du pic thermique

● Les paramètres importants du dimensionnement thermique

Dans le cadre du dimensionnement thermique, il est essentiel d'identifier les paramètres importants dont la variation est susceptible d'engendrer un fort impact sur l'ampleur des installations souterraines de stockage (en termes d'emprise et de volume excavé). À cet égard, l'impact de diverses dispositions opératoires et constructives a été étudié.

En termes d'exploitation, le premier paramètre important est la puissance résiduelle des déchets au moment du stockage qui dépend de la durée de leur entreposage préalable.

En termes de conception, plusieurs aspects ont été explorés. Il a été envisagé par exemple d'adapter le phasage de chargement. Cependant, cette stratégie n'apporte pas de gain en termes de compacité. Des dispositions constructives consistant à augmenter les surfaces d'échange entre les colis et le milieu géologique (par exemple chemisage à ailettes) ont également été explorées. Ces mesures qui contribuent à diminuer le flux surfacique présentent un intérêt limité car les gains obtenus en termes de compacité sont plus ou moins compensés par l'augmentation des coûts de construction de l'alvéole. La ventilation des alvéoles a aussi été envisagée. Elle n'a toutefois pas été retenue à ce stade des études, car il a été préféré une solution d'évacuation passive de la chaleur, ne nécessitant pas d'actions humaines en termes de maintenance. Enfin, diverses configurations géométriques ont été étudiées en termes d'espacement des alvéoles entre elles et des colis de déchets C à l'intérieur d'une même alvéole. Une étude paramétrique a mis en évidence l'importance de ces paramètres, notamment l'espacement entre les colis qui joue un rôle du premier ordre car il permet d'augmenter la longueur de l'alvéole horizontale jusqu'à une valeur raisonnable au plan de la faisabilité (40 mètres).

En conclusion paramètres importants retenus à ce stade pour le dimensionnement sont :

- la durée d'entreposage pour les colis fortement exothermiques ;
- l'espacement entre colis à l'intérieur d'une même alvéole et l'entraxe entre alvéoles.

La durée d'entreposage

L'évolution temporelle de la puissance thermique résiduelle des colis a une influence déterminante sur le choix de la durée d'entreposage préalable des colis primaires. En effet, il existe une durée en dessous de laquelle le respect des critères de température est impossible même pour un colis isolé (la température en paroi d'alvéole excède 90 °C). Au-delà de cette durée, l'emprise et le volume excavé pour stocker un colis (comprenant les volumes liés à l'alvéole et à la galerie d'accès) diminuent en fonction de l'âge des colis. La Figure 5.2.12 met en évidence, à titre d'exemple, l'influence de la durée de refroidissement sur le volume excavé pour le stockage d'un colis C1 en distinguant 3 domaines. Le domaine (A) correspond à des durées d'entreposage incompatibles avec le respect des critères thermiques, même pour un colis isolé. Le domaine A couvre la plage 0 – 45 ans environ. Dans le domaine (B), situé entre 45 ans et 60 ans environ, le volume excavé est très sensible à une petite variation de l'âge du colis. Dans le domaine (C) qui commence à partir de 60 ans environ, l'architecture est moins sensible à une variation de l'âge du colis au moment de sa mise en stockage. À la fin du domaine (C), au-delà d'une centaine d'années environ, le volume excavé et l'emprise du stockage ne diminuent quasiment plus en jouant sur la durée d'entreposage.

Le domaine C a donc été retenu comme domaine de dimensionnement des architectures de stockage. Le début du domaine est appelé stockage « au plus tôt » et constitue la référence pour les concepts proposés.

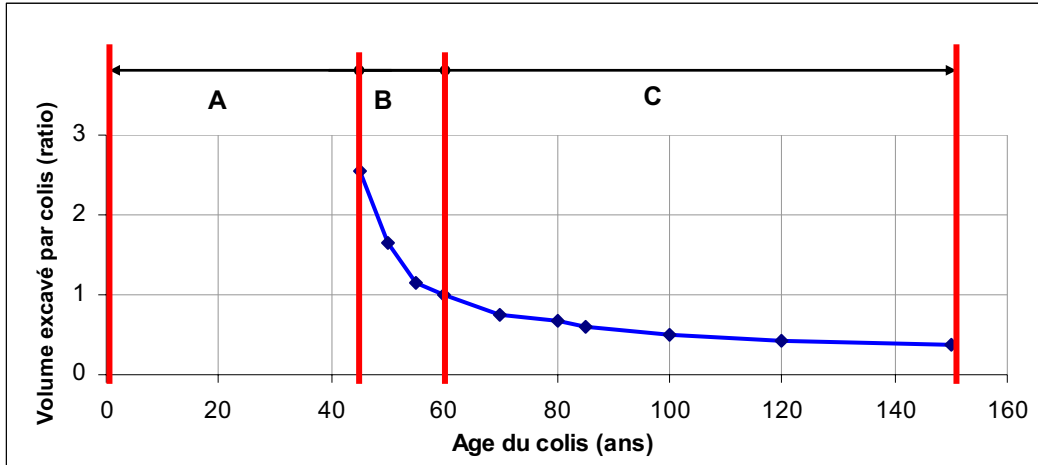


Figure 5.2.12 *Influence de la durée d'entreposage sur le volume excavé par colis C1 (volume normalisé par rapport au volume pour une durée d'entreposage de 60 ans)*

L'espace entre colis à l'intérieur d'une alvéole pour déchets C

L'espace entre colis est un paramètre important pour limiter le volume excavé nécessaire au stockage d'un colis. Il est lié à la notion de découplage thermique. Pour comprendre les raisons de l'importance de ce paramètre, il faut distinguer le volume utile (correspondant à la partie dans laquelle sont stockés les colis) du volume non utile (correspondant à l'ensemble des autres infrastructures souterraines de la zone de stockage telles que tête d'alvéoles et galeries d'accès).

La configuration intuitive qui consiste à positionner les colis à « touche-touche » engendre une très forte augmentation de la partie non utile. En effet, lorsque les colis sont juxtaposés, la puissance thermique dégagée par les colis dans le cas d'un stockage au plus tôt est telle que l'on ne peut placer qu'un faible nombre de colis par alvéole (de 1 à 2 selon les types de colis). Ceci engendre une dissymétrie importante entre les parties utile et non utile d'une même alvéole. Le nombre total d'alvéoles devient alors d'autant plus important que le nombre de colis par alvéole est faible, ce qui génère un très grand linéaire de galeries d'accès.

Si les colis sont éloignés les uns des autres il existe une valeur d'espace (valeur de découplage thermique) à partir de laquelle la charge thermique par mètre linéaire de la partie utile devient telle qu'il est possible de mettre un nombre de colis infini dans une alvéole de longueur supposée infinie. Il devient alors possible d'adopter la longueur d'alvéole la plus grande possible au regard de considérations technologiques, de construction et de manutention. Cette longueur a été fixée à la valeur raisonnable de 40 mètres (dont 30 utiles) pour l'ensemble des types de colis C.

Le rôle des intercalaires est de parvenir à une situation de « découplage thermique » des colis. Tant que les colis sont « thermiquement couplés », leur nombre et la longueur de l'alvéole sont limités pour respecter les critères thermiques. Le « découplage thermique » correspond à une configuration d'espace entre colis pour laquelle il est thermiquement possible d'adopter la longueur maximale d'alvéole (définie par des critères technologiques).

L'entraxe entre alvéoles pour déchets C

L'entraxe entre alvéoles influence également sur l'ampleur des installations de stockage dans le sens où il permet d'ajuster le nombre de colis contenus dans l'alvéole à sa valeur optimale. Le nombre de colis qu'il est possible de disposer dans une alvéole en respectant les critères thermiques croît lorsque l'espace entre alvéoles augmente. Les études montrent que lorsque cet espace augmente à partir de la valeur minimale (correspondant pour des raisons géotechniques à environ cinq fois le diamètre de l'alvéole), l'emprise des installations diminue, passe par un minimum puis augmente au-delà. L'entraxe entre alvéoles est donc un paramètre à optimiser.

● **Résultats du dimensionnement thermique et sensibilité aux paramètres importants**

Les résultats du dimensionnement thermique s'expriment en termes de variation des caractéristiques géométriques des installations en fonction de la durée d'entreposage. Les architectures des modules de stockage présentées ici ont été calculées pour une durée d'entreposage de 60 ans pour les colis C1 et C2 et de 70 ans pour les colis C3 et C4. Cela correspond à un stockage « au plus tôt » : les colis sont éloignés par des intercalaires découplant les phénomènes thermiques.

Pour les colis C0 (bénéficiant d'une durée d'entreposage d'au moins 20 ans) l'architecture correspond au stockage « au plus compact » : le nombre de colis contenus dans l'alvéole est maximal (18 ou 22 colis juxtaposés) et l'entraxe entre deux alvéoles est proche du minimum imposé par les considérations géotechniques.

Pour ces durées d'entreposage, le dimensionnement thermique permet de déterminer les paramètres géométriques suivants (voir Figure 5.2.13) :

- l'entraxe entre deux alvéoles adjacentes (ou le pas P_x) ;
- le nombre (N) et l'espacement de colis qu'elles contiennent (il est lié à la longueur utile de l'alvéole, L_{ua} , et au nombre N de colis) ;
- la distance entre fonds d'alvéoles (le pas D_y).

L'emprise par colis stocké s'en déduit aisément.

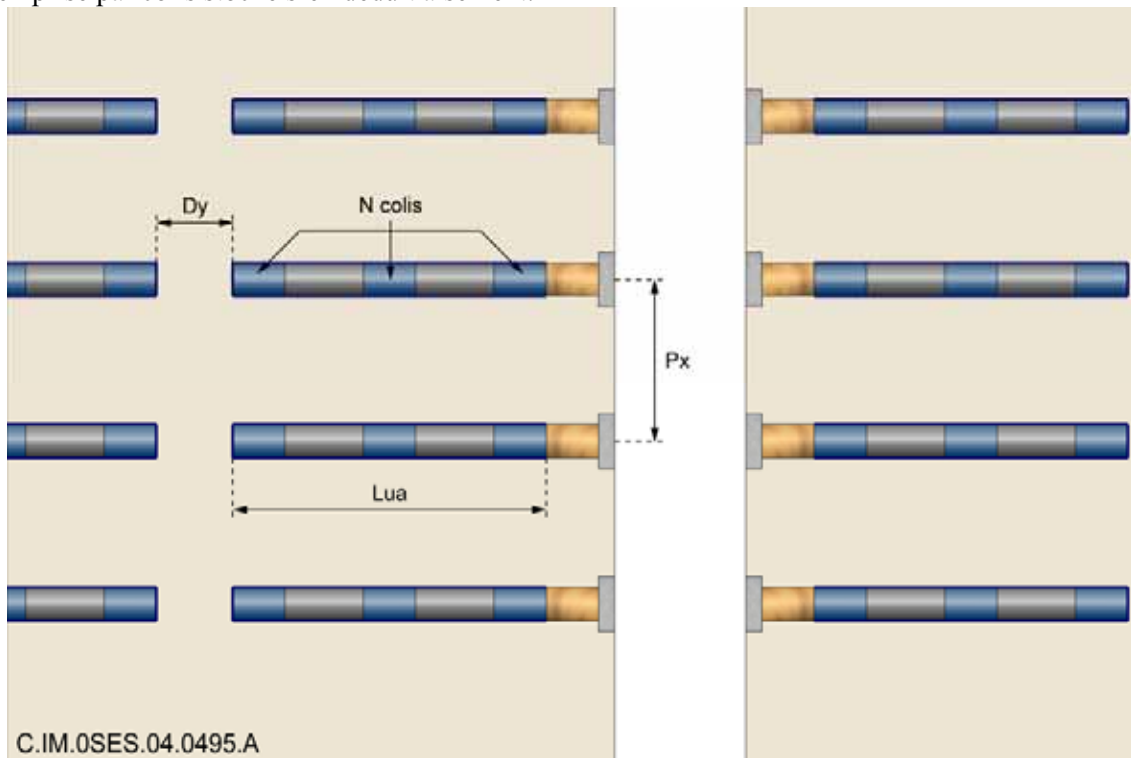


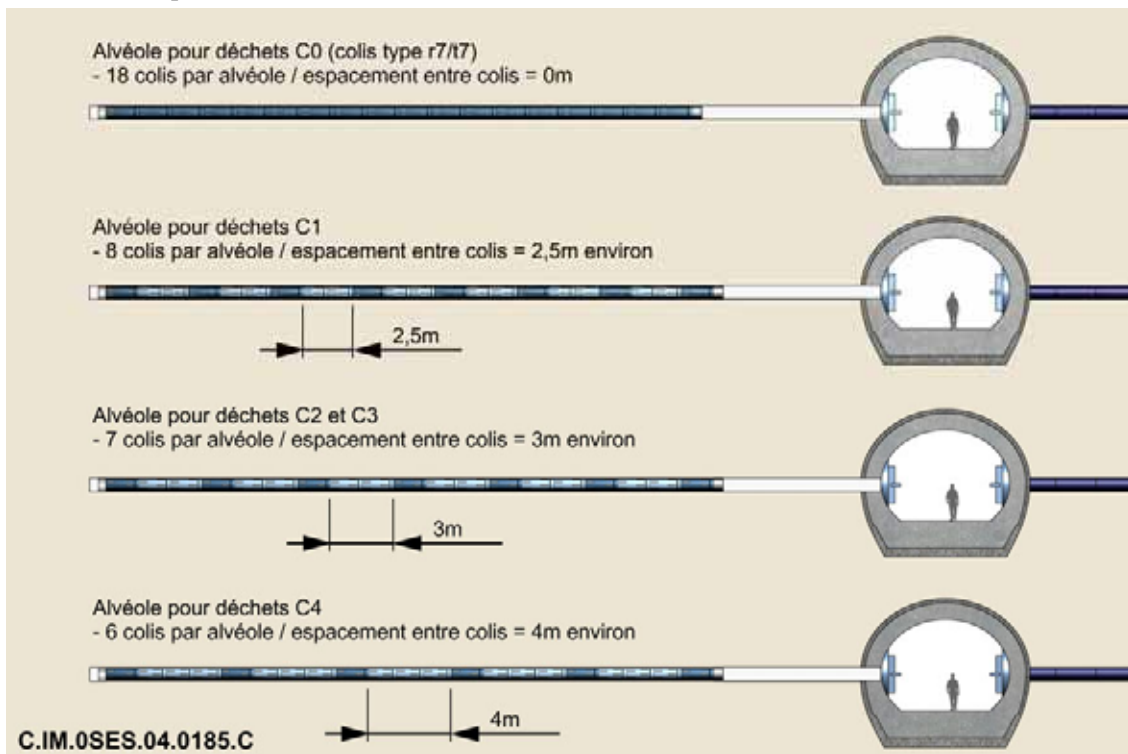
Figure 5.2.13 Paramètres géométriques du dimensionnement thermique

Les résultats sont reportés dans le Tableau 5.2.2 :

Tableau 5.2.2 *Emprise pour stocker un colis C*

Type de colis de stockage	C0 (AVM)	C0 (R 7/T7)	C1	C2	C3	C4
Age (ans) : durée entreposage.	20	20	60	60	70	70
Emprise horizontale (m ² /colis stocké)	20	25	80	85	103	115
N : nombre de colis par alvéole	22	18	8	7	7	6
Px (m) : entraxe entre alvéoles	8,5	8,5	12	11	13,5	13
Dy (m) : distance entre fonds d'alvéoles	20	20	20	20	20	20
Lua (m) : longueur utile de l'alvéole	30	30	30	30	30	30
Pc (m) : pas entre colis	0	0	2,4	3,1	3,1	4,0

La Figure 5.2.14 illustre les différences d'espacements de colis, dans les alvéoles, en fonction de leur puissance thermique.

Figure 5.2.14 *Coupes longitudinales d'alvéoles C*

On notera que l'évolution de la température entre 0 et 600 ans en paroi d'alvéole, au point le plus chaud de l'argilite (Figure 5.2.15), fait apparaître un retour sous le seuil des 70 °C avant 1 000 ans, permettant d'exclure tout risque de transformations minéralogiques de l'argilite.

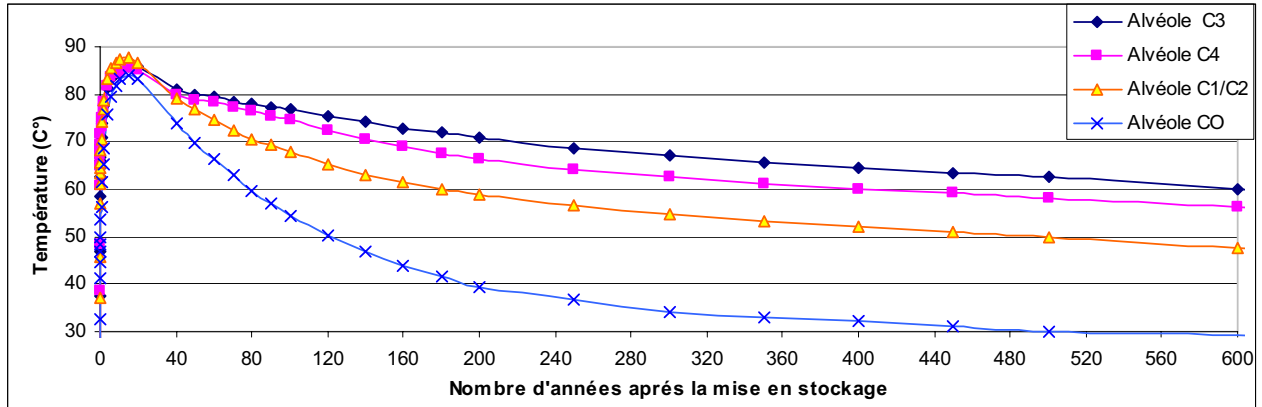


Figure 5.2.15 Température en paroi d'alvéole pour les déchets C (point le plus chaud de l'argilite)

Sensibilité vis-à-vis des incertitudes sur les données d'entrée.

En dehors des éléments de conception visant à favoriser la dissipation de la chaleur (colis et chemisage acier), les paramètres principaux suivants interviennent sur le pic de température :

- les caractéristiques thermiques du milieu géologique (argilites du Callovo-Oxfordien) ;
- la présence ou non d'un jeu fonctionnel entre le chemisage et le milieu géologique⁷⁷.

Les incertitudes sur ces paramètres ont été approchées à travers plusieurs calculs de sensibilité. Il en ressort une augmentation ou une diminution de la température de pic de l'ordre de +/- 10 °C environ. On vérifie ainsi qu'en prenant en compte ces incertitudes la température dans la roche ne dépasse pas 100 °C.

On peut évaluer les conséquences de ces écarts en termes d'impact sur la durée préalable d'entreposage des colis. La variation de durée d'entreposage ainsi induite, pour un stockage « au plus tôt », est d'environ +/- 10 ans.

● Conclusion sur le dimensionnement thermique

Les dimensions des modules de stockage des déchets C résultent essentiellement du dimensionnement thermique. Celui-ci est en effet à l'origine des définitions du nombre de colis par alvéole et de l'entraxe des alvéoles. Toutefois, des marges d'optimisation existent si l'on démontre la faisabilité d'alvéoles plus longues, tant du point de vue de leur construction que du point de vue de la maintenance des colis. Cette piste d'optimisation n'a pas été explorée à ce stade des études.

5.2.3.4 Dimensionnement mécanique et thermomécanique du système alvéole - galerie d'accès

Le dimensionnement mécanique et thermomécanique vise à assurer l'intégrité de la structure du système alvéole – galerie d'accès et des jeux fonctionnels pendant une durée a minima séculaire. Il concerne d'une part l'épaisseur du chemisage et d'autre part les caractéristiques du revêtement en béton de la galerie d'accès.

● Calcul du chemisage de l'alvéole

Les phénomènes de nature à affecter l'intégrité du chemisage à long terme sont les suivants :

- Le fluage de l'argilite, qui comble le vide annulaire à l'extrados du chemisage et engendre une contrainte de compression radiale autour de ce dernier. La valeur de cette dernière à une date

⁷⁷ L'épaisseur des jeux fonctionnels importe moins que le nombre de jeux situé entre le colis et le milieu géologique. En effet la différence de température induite par une lame d'air entre 2 cylindres est très peu sensible à l'épaisseur de cette lame entre 1 cm et plusieurs cm.

donnée est fonction de la vitesse de fluage de l'argilite et de la dimension de l'espace annulaire initial. La vitesse du fluage est elle-même conditionnée par la température de l'argilite ;

- la dilatation du terrain (produite par l'exothermicité des colis) crée, en l'absence de jeu, une contrainte de compression radiale qui se rajoute à la précédente. Cette contrainte augmente pendant les premières décennies, puis décroît après le passage du pic de température ;
- le différentiel de dilatation entre l'acier et l'argilite (engendré par l'exothermicité des déchets) combiné aux efforts de frottement latéral créés par le fluage de l'argilite engendre une contrainte de compression axiale dans le chemisage. Ce phénomène subit une évolution temporelle similaire au précédent ;
- enfin, l'acier du chemisage peut se corroder. Son épaisseur inclut ainsi une réserve de corrosion de 5 mm.

Quantification des contraintes de chargement radial

Compte tenu des incertitudes sur l'espace annulaire initial et sur la cinétique des divers phénomènes en cause, le choix est fait de dimensionner l'épaisseur de chemisage pour le cas de charge de 12 MPa, qui correspond à la contrainte géostatique initiale du milieu géologique.

Calcul de l'épaisseur du chemisage

Connaissant la charge appliquée au chemisage, il est possible de calculer l'épaisseur qui permet de ne pas dépasser un certain niveau de contrainte dans l'acier. Cette épaisseur est de 20 mm (hors réserve de corrosion), pour un acier de nuance S235 [65], choisi pour sa compatibilité avec le surconteneur, mais présentant de faibles caractéristiques thermiques.

Ce dimensionnement inclut des marges de sécurité. En effet, l'épaisseur nécessaire du chemisage varie fortement avec la charge radiale considérée, et la charge de 12 MPa prise en compte est particulièrement élevée. On notera par ailleurs qu'une épaisseur plus faible pourrait être envisagée en considérant une nuance d'acier plus résistante.

Vérification du dimensionnement au regard des contraintes thermiques de chargement axial et du risque de flambage

Lors de l'élévation de température, le chemisage tend à se dilater radialement et axialement.

La dilatation thermique du chemisage, en déplacements libres, serait d'ordre centimétrique⁷⁸. Cet allongement devrait être a priori absorbé aux deux extrémités du chemisage, laissées libres. Dans l'éventualité où le terrain se serait rapidement refermé sur le chemisage, la déformation du tube pourrait s'avérer contrariée ; il en résulterait une contrainte axiale dans le tube, proche de la limite élastique de l'acier S235 à 100 °C. Compte tenu de la capacité des argilites à accompagner la déformation du chemisage, l'apparition de déformations plastiques dans le chemisage n'est pas envisagée.

Le risque de flambage⁷⁹ a été examiné en fonction des éléments précédents, tant du point de vue des sollicitations radiales (risque de « collapse » du tube) que des sollicitations axiales. La résistance au flambage du chemisage a été vérifiée pour l'épaisseur de 20 mm (hors réserve de corrosion)⁸⁰.

● **Dimensionnement du revêtement en béton de la galerie d'accès**

Le revêtement de la galerie d'accès est dimensionné pour résister aux effets du dégagement thermique des déchets (dilatations radiales du béton et de l'argilite) et du fluage de l'argilite (lui-même accéléré

⁷⁸ Pour l'acier type S235 considéré et une longueur du chemisage d'environ 40 m, une élévation de température maximale de 78°C induit un allongement du chemisage de 4 cm

⁷⁹ Le flambage est une rupture avec grandes déformations d'une pièce sollicitée en compression. Il se produit en cas de dépassement d'une contrainte critique.

⁸⁰ La présence du terrain autour du chemisage limite les déformations latérales possibles, ce qui augmente fortement la contrainte critique ; cet effet a été pris en compte dans la vérification effectuée.

par la thermique). Pour ces galeries ventilées en phase d'exploitation, on a pris en compte une désaturation de l'argilite qui rigidifie cette dernière et réduit sa vitesse de fluage.

Le revêtement en béton est mis en place au contact de la roche (sans vide annulaire), après une phase de déconfinement permettant une certaine relaxation des contraintes. Il a été retenu à titre d'hypothèse une pose du revêtement à 9 mois. La contrainte de compression radiale due au poids des terres appliqué au revêtement est de l'ordre de 6 MPa⁸¹ au bout d'un siècle⁸². Cette valeur intègre l'accélération du fluage sous l'effet de l'élévation de la température et prend en compte, de manière modérée, l'effet modérateur de la désaturation.

La contrainte thermomécanique dans le béton est assimilable à une charge radiale ; sa valeur, au moment du pic de température, est de l'ordre de 2 MPa.

La charge radiale totale équivalente appliquée au revêtement en béton est de l'ordre de 8 MPa (hors coefficients de pondération). Cette valeur est à comparer aux 12 MPa de contrainte isostatique qui s'appliquent en théorie au bout d'un temps infini.

Le calcul mené conduit à une épaisseur du revêtement d'environ un mètre⁸³, pour un béton de type B60. La composante thermique pèse pour environ 40 % dans cette épaisseur.

L'acquisition d'une meilleure connaissance des vitesses de fluage en conditions insaturées pourrait conduire à réduire ces épaisseurs de béton.

On notera que ce revêtement de galerie est d'épaisseur supérieure à celui des alvéoles de déchets B, dont la section utile est pourtant plus grande. La différence tient essentiellement à l'effet thermique. La prise en compte de l'accélération du fluage sous l'effet du dégagement thermique des déchets C est responsable de la surépaisseur du revêtement des galeries d'accès des modules C.

5.2.3.5 Évaluation de l'impact sur l'argilite dans l'environnement proche de l'alvéole

Le souci de limiter l'endommagement de la formation géologique dans l'environnement proche des alvéoles conduit à vérifier le faible impact de la construction des alvéoles de stockage sur l'argilite.

● Impact à court terme

La conception a visé à minimiser l'impact à court terme, d'une part en orientant les alvéoles parallèlement à la contrainte horizontale majeure, afin de réduire l'extension de la zone fracturée autour de l'alvéole, et d'autre part en espaçant suffisamment les alvéoles, afin de réduire les interactions mécaniques entre elles. À cette fin, un entraxe minimum correspondant à 5 diamètres d'alvéole a été retenu.

L'extension des zones fracturées⁸⁴ et microfissurées⁸⁵ autour des ouvrages au moment de leur ouverture est d'abord évaluée en supposant la roche non soutenue, et en ignorant les effets de la galerie d'accès voisine. Les résultats des calculs purement mécaniques [66] sont exposés dans le Tableau 5.2.3 ci-après. Ils indiquent que la construction des alvéoles C, à une profondeur de 500 m, n'induit pas de zone fracturée.

⁸¹ Il s'agit d'une valeur moyenne ; compte tenu de l'orientation des galeries d'accès, la contrainte est anisotrope.

⁸² En cas de prolongation de l'utilisation de la galerie, des travaux confortatifs restent possibles.

⁸³ Le régime de contrainte anisotrope et la forme de la galerie conduisent à des épaisseurs supérieures en voûte (1,20 m) et en radier (1,40 m).

⁸⁴ Zone fracturée : zone géomécanique au droit de l'ouvrage dans laquelle le seuil de rupture peut être dépassé. Cette zone est caractérisée par l'apparition de **fractures** pouvant être connectées, ce qui conduit à une augmentation significative de la **perméabilité** de la roche ($5 \cdot 10^{-9}$ m/s contre $5 \cdot 10^{-14}$ / $5 \cdot 10^{-13}$ m/s pour la roche saine).

⁸⁵ Zone microfissurée : zone apparaissant soit au voisinage de l'ouvrage si la **zone fracturée** ne s'est pas produite, soit derrière la **zone fracturée** si cette dernière s'est produite. Cette zone est caractérisée par une microfracturation diffuse peu connectée, n'engendrant qu'une augmentation limitée de la **perméabilité** ($5 \cdot 10^{-11}$ m/s).

Tableau 5.2.3 Extension des zones fracturée et microfissurée à court terme (profondeur 500 m)

Horizon géologique C, ouvrages circulaires supposés isolés	Extension, en ratio du rayon R, mesurée à partir de la paroi de l'ouvrage	
	Zone fracturée	Zone microfissurée
Alvéole (orientation parallèle à la contrainte majeure)	Aucune	0,5 R
Galerie d'accès (orientation perpendiculaire à la contrainte majeure)	0 à 0,1 R ellipsoïde d'élançement vertical	0,3 à 0,7 R ellipsoïde d'élançement vertical

Afin d'éviter que l'interaction avec la galerie d'accès n'augmente l'endommagement au droit de la partie utile de l'alvéole et de son bouchon de scellement, ces derniers sont implantés en dehors de la zone endommagée de la galerie. Du fait de leur orientation perpendiculaire à la contrainte horizontale majeure, les galeries d'accès sont entourées d'une zone microfissurée en forme d'ellipsoïde dont le grand axe est vertical, et dont le petit axe, horizontal, vaut 0,3 fois le rayon R de la galerie [66]. La prise en compte de considérations sur le mode de fonctionnement du bouchon de béton a conduit à prévoir une longueur de 4 m pour ce dernier. Le bouchon d'argile gonflante est donc implanté à 4 m de la galerie d'accès, dans une zone échappant à l'endommagement induit par celle-ci.

● Impact à long terme

À plus long terme, l'argilite flue librement jusqu'à venir s'appuyer sur le chemisage de l'alvéole, puis sur les colis lors de la rupture du chemisage (après corrosion de ce dernier). Les différents vides annulaires doivent par conséquent être minimisés pour limiter la déformation de l'argilite. Compte tenu des divers mécanismes en cause, et du faible diamètre de l'alvéole C, l'apparition d'une zone fracturée d'épaisseur significative est considérée peu vraisemblable.

De plus, la zone du scellement fait l'objet d'un traitement particulier afin d'y préserver les caractéristiques de l'argilite (voir section 5.2.6).

L'évolution à long terme des galeries est traitée à la section 7.6.

5.2.3.6 Comportement sismique de l'alvéole

Les sollicitations sismiques à considérer en profondeur ont été évaluées [36]. Elles sont sans impact sur le dimensionnement des ouvrages et sur le comportement à long terme des argilites. En effet, l'action d'un séisme est très limitée en profondeur, par rapport à ce qui se passe en surface, en raison de l'amplification des mouvements sismiques en surface, de la faible amplification dynamique subie par les ouvrages enterrés et de la faible dimension des ouvrages, vis-à-vis de la longueur d'onde des mouvements sismiques. L'analyse des différents effets dynamiques possibles (interaction de l'onde sismique avec une cavité isolée et diffraction sur les ensembles de cavités que constitue le stockage), appliquée aux différents types d'assemblages de cavités d'un stockage, montre que dans l'ensemble les effets dynamiques sont négligeables.

5.2.3.7 Durabilité de l'alvéole

On considère ici la fonction du chemisage relative au maintien de conditions favorables de retrait des colis pendant une durée pluri séculaire (réversibilité). Cette durabilité dépend essentiellement de la corrosion qui s'opère et de la tenue mécanique du chemisage. Une estimation a été faite de la corrosion. Le dimensionnement retenu pour le chemisage tient compte d'une épaisseur de corrosion et d'une épaisseur pour la résistance mécanique.

Le chemisage décrit est constitué d'un acier de même famille que celui du surconteneur : les propriétés mobilisées sont de même nature (mécaniques et physico-chimiques) et cette similitude de matériaux évite les effets de corrosion galvanique.

Le régime (et les vitesses) de corrosion sont identiques à ceux décrits au chapitre 4 pour le surconteneur (section 4.2.3.2). Ils se déclinent en trois périodes successives : une période initiale sans corrosion, une période transitoire de corrosion oxydante et une période de corrosion anoxique où la vitesse de corrosion devient très faible (quelques dixièmes de micromètre à quelques micromètres par an [53]). Les risques de corrosion localisée (par piqûres ou par effet de crevasse) ou de corrosion spécifique (corrosion sous contrainte, fragilisation par l'hydrogène) ont été pris en compte et leurs conséquences évaluées. Au terme de l'analyse menée, la corrosion généralisée est considérée comme le mécanisme de corrosion dominant à moyen et long terme.

Dans ces conditions, la réserve de corrosion de 5 mm du chemisage ne se consommera qu'en plusieurs siècles⁸⁶. Cette durée prévisionnelle est cohérente avec les constats effectués sur des analogues archéologiques.

On notera également que les connexions du chemisage peuvent offrir une certaine étanchéité qui contribue à sa durabilité, même si cette étanchéité n'a pas été définie comme fonction du chemisage et n'a pas été prise en compte dans les évaluations de sûreté du stockage.

5.2.3.8 Compatibilité avec la méthode de mise en place des colis de stockage

La conception de l'alvéole et de la galerie d'accès prend en compte les contraintes d'exploitation, en particulier le mode de mise en place des colis.

À cet égard, l'alvéole doit avant tout permettre la translation des colis par glissement des patins sur le chemisage. La galerie d'accès, quant à elle, doit être suffisamment large pour permettre à l'engin portant la hotte de se déplacer et de se mettre en position d'accostage.

La section 9.6 fournit la description des différents systèmes de transfert des colis dans les galeries d'accès, d'accostage de la hotte et de mise en place des colis dans l'alvéole par robot pousseur. On donne ci-dessous quelques éléments saillants du point de vue de la conception de l'alvéole et de la galerie d'accès.

● Conception/construction de l'alvéole

Afin de permettre la progression du colis et du robot pousseur, un jeu fonctionnel de 30 mm au diamètre a été prévu dans la conception de l'alvéole. Ce jeu fonctionnel s'entend hors tout pour les colis (notamment hors patins). Il a été réduit autant que possible à ce stade, dans le but de limiter les dégradations mécaniques de l'argilite à très long terme dans l'hypothèse d'un écrasement du chemisage. Il vise à permettre le glissement des colis sans risque de coincement, lié par exemple à un défaut d'alignement des tronçons de chemisage ou à la présence d'aspérités ou de marches au niveau des connexions. Pour maîtriser ces risques, plusieurs dispositions techniques sont envisageables :

- maîtrise de l'alignement des tronçons de chemisage ; des désalignements peuvent provenir d'un défaut angulaire, ou d'un décalage latéral de tronçons correctement orientés ; une visée optique avant soudage des éléments de tube permet de s'affranchir des défauts d'alignement angulaire lors du montage du chemisage ; de même, le désalignement par décalage latéral est contrôlé par visée optique et par un dispositif de centrage ;
- obtention d'une bonne surface de glissement ; celle-ci dépend d'abord de la qualité des connexions ; les connexions sans manchon intérieur décrites plus haut répondent à ce besoin.

Par ailleurs, les calculs de radioprotection montrent qu'un bouchon cylindrique sans épaulement suffit à assurer la radioprotection ; l'absence d'épaulement sur le bouchon métallique, et donc sur le chemisage, simplifie la mise en place des colis.

Tous ces éléments de conception qui facilitent la mise en place des colis sont par ailleurs favorables à la réversibilité. En effet, le passage des colis lors d'une éventuelle opération de retrait n'entraîne pas

⁸⁶ Les hypothèses adoptées pour dimensionner la réserve de corrosion du chemisage sont raisonnables ; elles sont toutefois moins conservatrices que pour le surconteneur des colis C. Ceci s'explique par l'absence de fonction de sûreté à long terme associée au chemisage.

de difficulté particulière par rapport à la situation de mise en place. Le retrait offre même des facilités supplémentaires liées à la possibilité d'exercer des efforts significatifs de traction sur les colis.

- **Conception de la galerie d'accès**

La section utile de la galerie d'accès est dimensionnée par la translation et la mise en position d'accostage de la hotte. La hotte se déplace en position transversale dans la galerie (sans rotation pour l'accostage). La figure ci-dessous illustre l'accostage de la hotte au droit d'une alvéole.

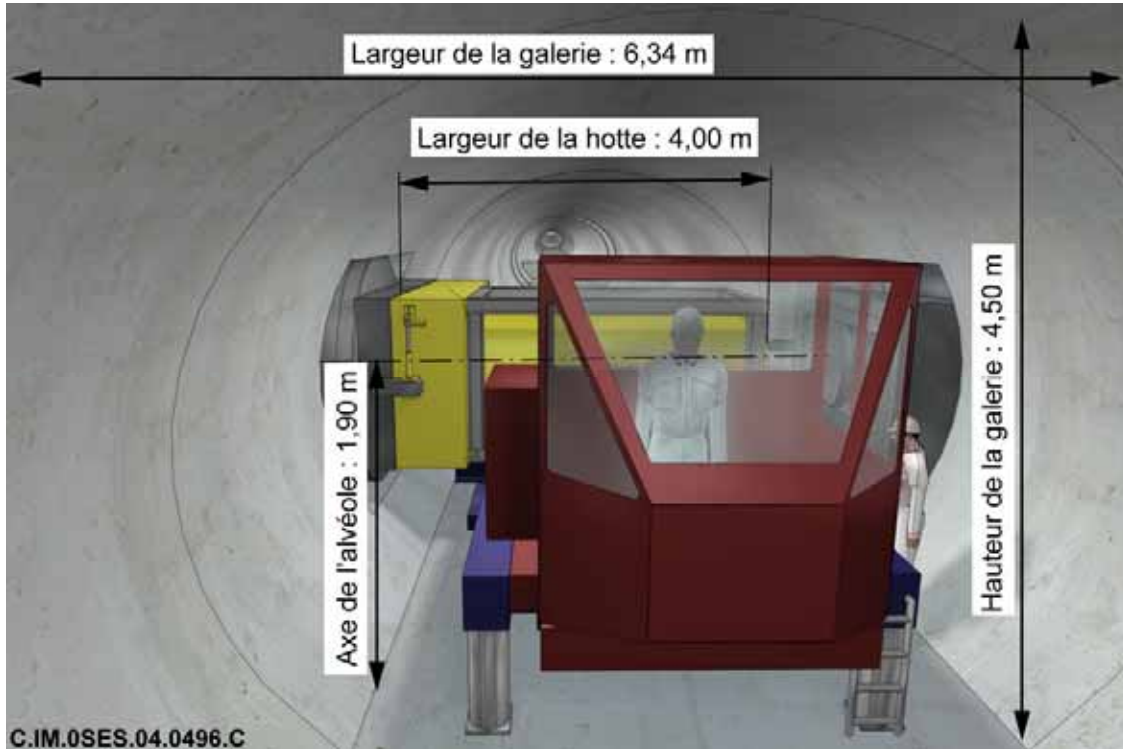


Figure 5.2.16 Accostage de la hotte de transport des déchets C en face de l'alvéole

5.2.4 Agencement des alvéoles et des galeries d'accès dans le module de stockage

5.2.4.1 Structure du module

Une unité d'exploitation est constituée de 3 galeries d'accès, de rameaux perpendiculaires, dits « recoupes », et de 150 à 200 alvéoles de stockage (Figure 5.2.17).

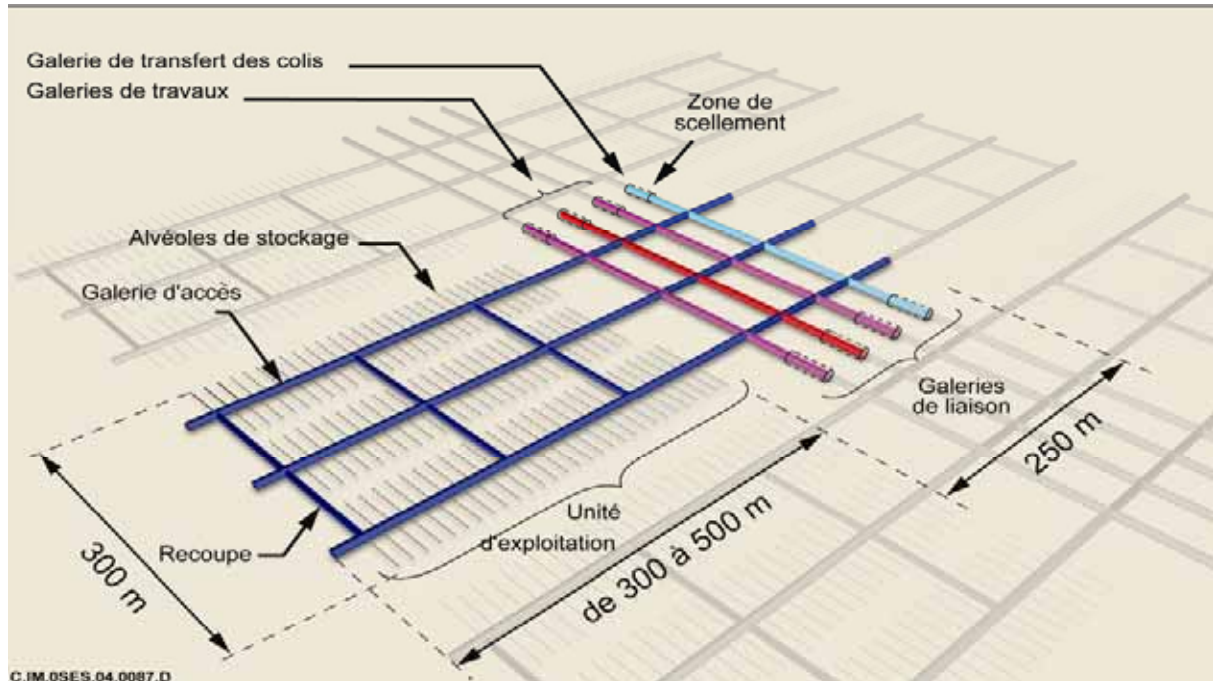


Figure 5.2.17 Agencement général d'une unité d'exploitation d'un module de déchets C

Les alvéoles sont implantées perpendiculairement aux galeries d'accès. La longueur des galeries d'accès a été limitée à environ 600 m au regard de considérations d'exploitation.

Les unités d'exploitation sont réparties de part et d'autre d'un faisceau de 4 galeries parallèles, les galeries d'infrastructure secondaire (voir chapitre 7). À la fermeture, chaque module regroupant deux unités d'exploitation située en vis-à-vis est séparé des autres par des scellements, de façon à réaliser le fractionnement de la zone de stockage.

Cette disposition permet d'orienter favorablement les alvéoles et les scellements, par rapport aux contraintes naturelles.

La longueur des alvéoles est constante, ainsi que la distance entre fonds d'alvéoles. L'entraxe des alvéoles (pas P_x) et l'espacement des colis au sein d'une alvéole varient selon les colis, en fonction de leur puissance thermique. Comme cela a été exposé plus haut, l'entraxe varie de 8,5 à 13,5 m, l'espacement entre colis de 0 à 4 m ; la distance entre fonds d'alvéole est de 20 m.

5.2.4.2 Prise en compte des contraintes de ventilation

En phase d'exploitation, pour pouvoir s'affranchir de ventubes et gaines de ventilation (et ainsi minimiser le diamètre des galeries), deux galeries d'accès assurent l'alimentation en air frais en pleine section tandis que la troisième assure le retour d'air, également en pleine section (voir Figure 5.2.18).

Les zones d'activités sont strictement réservées aux deux galeries en entrée d'air et aux recoupes qui les relie. Cette disposition permet donc de disposer en permanence de deux arrivées d'air frais. En cas d'incendie, l'une au moins de ces deux galeries est accessible comme issue de secours et comme arrivée des secours.

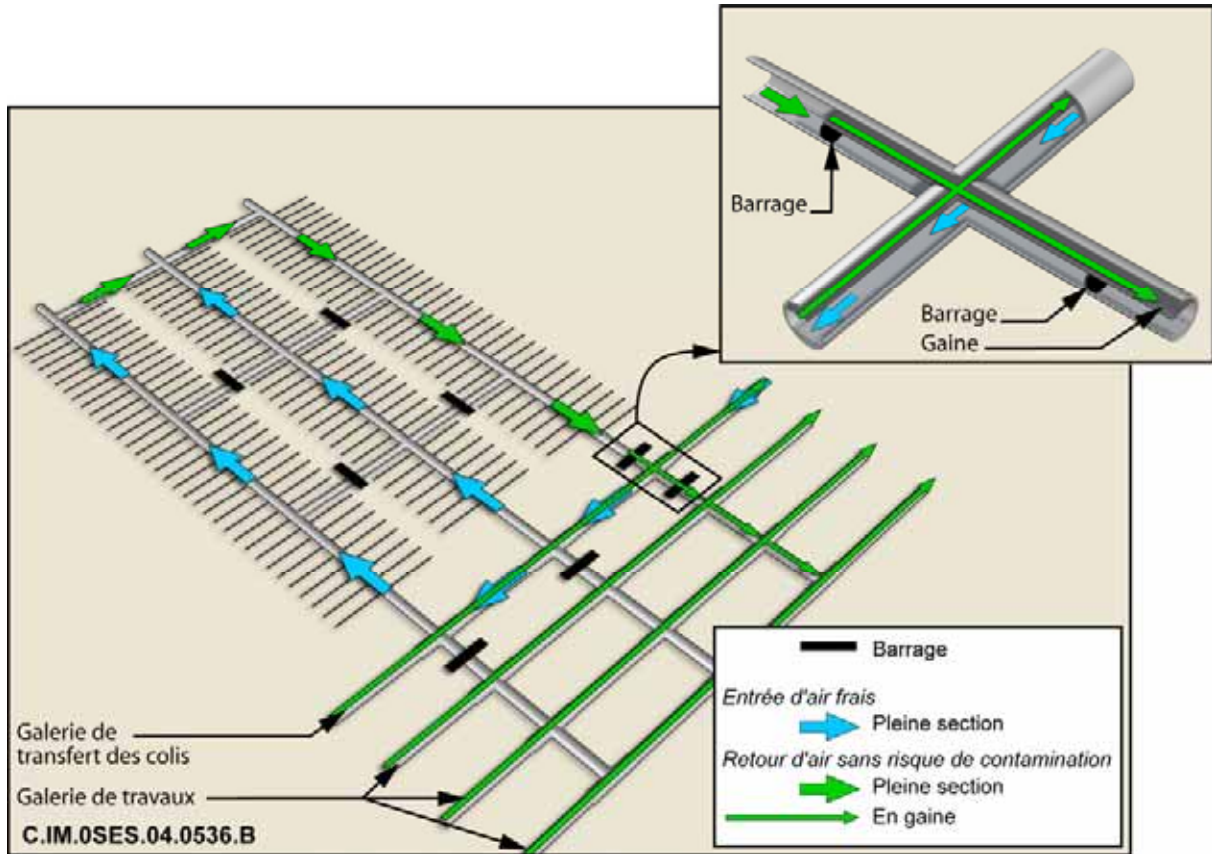


Figure 5.2.18 Ventilation d'une unité C en exploitation

5.2.5 Construction de l'alvéole

Pour la construction de l'alvéole, différents processus éprouvés et procédés industriels sont envisageables. La présente section les présente brièvement, avec leurs avantages et leurs inconvénients. Elle décrit ensuite l'un d'entre eux en indiquant les raisons qui ont conduit à le privilégier, à ce stade des études.

5.2.5.1 Différents processus disposant chacun de plusieurs techniques envisageables

La construction des alvéoles se réalise en trois processus élémentaires :

- le creusement ;
- la mise en place du chemisage ;
- et l'assemblage des tronçons de chemisage.

L'enchaînement de ces processus élémentaires est plus ou moins dépendant ou dissociable du procédé choisi ; ainsi, la mise en place du chemisage peut être réalisée simultanément au creusement ou à l'issue de ce dernier.

● Procédés de creusement : forage ou micro-tunnelier

Deux procédés sont envisageables pour le creusement d'un tunnel horizontal de 700 mm de diamètre :

- la technique de type « forage horizontal » ;
- le creusement au micro-tunnelier.

Le terme « forage » désigne ici toute technique dans laquelle la rotation de l'outil de coupe est réalisée par un moteur restant dans la galerie d'accès (sur la foreuse) et dans laquelle un train de tiges central transmet cette rotation et la poussée sur l'outil. À l'inverse, le moteur de rotation du micro-tunnelier

pénètre dans l'excavation et suit la roue de coupe. La poussée sur l'outil est transmise par un tube qui est généralement laissé en place comme chemisage.

Les techniques de forage semblent offrir des cadences plus élevées que la technique du micro-tunnelier (cadences industrielles, hors raccordement des tubes : de l'ordre de 5 m/h, contre 2 m/h pour le micro-tunnelier)

La technique du micro-tunnelier permet quant à elle un meilleur contrôle des déviations de trajectoire. Cependant ce critère n'est pas pertinent ici, la position du fond d'alvéole important peu à un mètre près.

Les deux méthodes sont jugées équivalentes vis-à-vis de l'espace annulaire créé au départ ; elles offrent les mêmes possibilités d'adopter une trousse coupante laissée en place ou un outil rétractable, retiré après creusement ; les encombrements des machines sont comparables.

La méthode du forage est privilégiée, à ce stade, pour sa plus grande rapidité d'exécution. Le micro-tunnelier constitue néanmoins une alternative tout à fait envisageable.

● **Mise en place du chemisage : pendant ou après creusement**

Le chemisage peut être mis en place et avancé dans l'alvéole au fur et à mesure du creusement ; il est également possible de réaliser tout d'abord le creusement de la totalité de l'alvéole et de ne mettre en place le chemisage qu'ensuite.

De manière générale, les perturbations induites dans un terrain creusé augmentent avec la durée pendant laquelle il est laissé sans soutien. À cet égard, une mise en place du chemisage simultanément au creusement est de nature à minimiser la convergence instantanée du terrain si l'espace annulaire initial est suffisamment faible.

De plus, cette méthode ne peut que réduire les éventuels risques de perte de l'ouvrage par déstabilisation des parois non soutenues.

Elle induit, en revanche, les contraintes suivantes :

- une technologie permettant, en fin de foration, de retirer l'outil en le rétractant dans le tube laissé en place ;
- une fermeture a posteriori du fond du tube ;
- un nettoyage du chemisage après sa mise en place.

Des solutions techniques existent pour satisfaire ces trois besoins.

L'introduction du chemisage pendant le creusement est donc privilégiée dans la description qui suit. La solution consistant à mettre en place le chemisage après foration constitue toutefois une alternative possible.

● **Technique de forage : marteau fond de trou, ou « rotary » à outil à dents carbure**

Deux techniques de forage à l'air permettent le retrait de l'outil dans un tube laissé en place :

- le marteau fond de trou à taillants rétractables⁸⁷ ;
- et le forage « rotary » à dents carbures et taillants pivotants.

Ces deux techniques offrent des cadences industrielles voisines (de l'ordre de 5 m/h, hors connexion des tubes). La technique du marteau fond de trou serait toutefois légèrement plus rapide (des essais in situ sont nécessaires pour affiner les estimations). En revanche, elle nécessite d'utiliser des compresseurs puissants (70 m³/mn, pour une pression de 1 MPa), et impose un traitement de la poussière en tête d'alvéole.

Cette analyse conduit à considérer que les deux solutions sont envisageables pour la réalisation des alvéoles de déchets C.

⁸⁷ Des outils à couronne perdue sont également disponibles ; ils ont été exclus pour des raisons de coûts, au profit des techniques de taillants pivotants, qui offrent l'avantage d'une récupération complète de l'outil.

● **Mode d'assemblage des éléments de tube du chemisage**

Les éléments de chemisage peuvent être connectés selon différentes techniques :

- le soudage automatique de tubes de dimensions analogues est largement éprouvé (pose de pipelines) ; c'est toutefois la technique la plus longue à mettre en œuvre dans le cas des alvéoles de déchets C ;
- la connexion par filetage permet une mise en œuvre rapide. Les références sur lesquelles elle s'appuie sont moins nombreuses ; son coût est plus élevé ;
- les connexions par verrouillage mécanique sont particulièrement adaptées aux conditions de chantier (rapidité de mise en œuvre, machine de rotation inutile).

À ce stade, la solution par soudage constitue une référence intéressante car elle bénéficie d'un très important retour d'expérience.

5.2.5.2 Description d'une solution complète de construction

Compte tenu de ce qui précède, une solution de construction est la suivante [65] (voir Figure 5.2.19) :

- la foration de l'alvéole est réalisée par un outil de coupe suivi dans sa progression par un tube permettant de tenir le terrain ; ce tube est laissé en place pour constituer le chemisage ;
- les éléments de chemisage sont poussés par un « pousse tube » monté sur la foreuse ; ils sont soudés les uns aux autres, à mesure de leur introduction. L'ensemble foreuse – pousse tube prend appui sur le « bâti de poussée » fixé dans la galerie d'accès. Le chemisage est poussé sans tourner dans le terrain ;
- les taillants périphériques sont rétractables : mis en position écartée pour la foration, ils donnent à l'excavation un diamètre légèrement supérieur à celui du chemisage ; ils sont repliés en fin de foration, pour le retrait de l'outil de forage à l'intérieur du chemisage ;
- le fond du chemisage est ensuite obturé par soudage d'une plaque.

Ces différentes phases et les équipements associés sont décrits ci-dessous.

À l'issue de ces opérations, la tête de l'alvéole est équipée avec le dispositif nécessaire à son exploitation (operculaire).

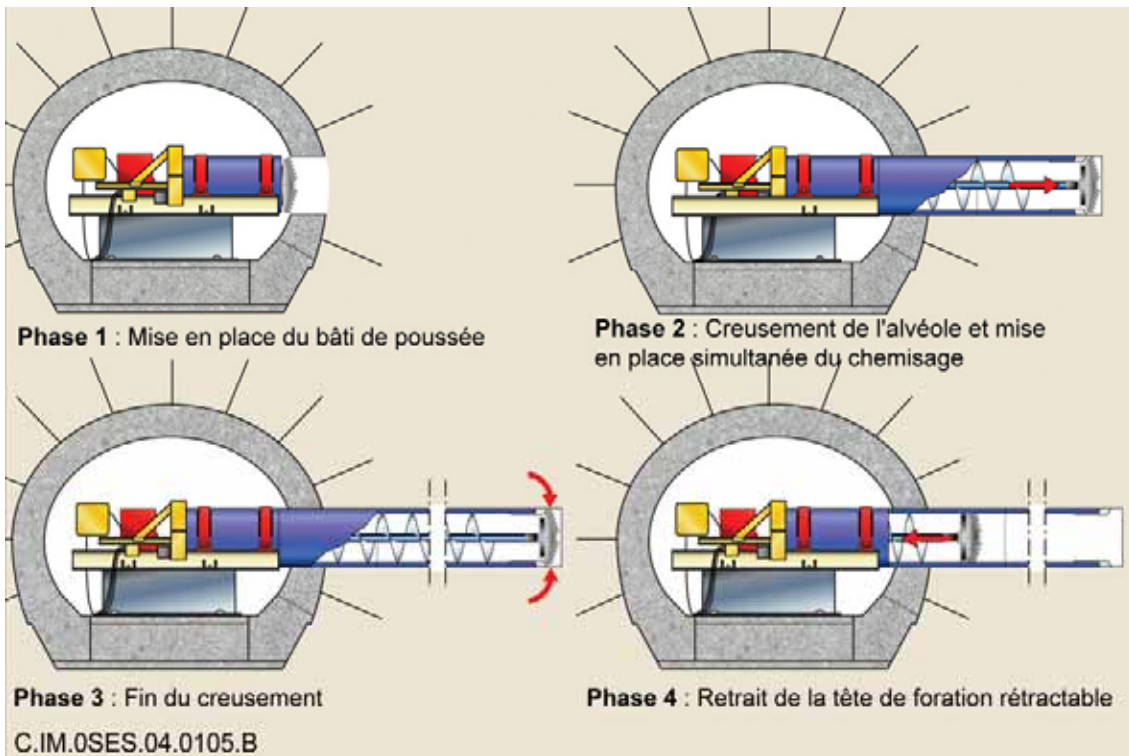


Figure 5.2.19 Séquence de creusement d'une alvéole C

- **Le bâti de poussée**

Le bâti de poussée est ancré au revêtement de la galerie. La longueur de l'équipement en galerie est d'environ 5 m (compatible avec des éléments de chemisage de 2,5 m de longueur).

- **Outil de coupe et train de tiges**

L'outil de coupe proposé est un outil à dents carbure. Les trois taillants périphériques sont pivotants, et sont rétractés en fin de foration (voir Figure 5.2.20).

La poussée et la rotation de l'outil de coupe sont transmises par un train de tige. Il semble judicieux de garnir le train de tige d'une vis hélicoïdale garantissant centrage et évacuation des déblais. Toutefois, d'autres solutions d'évacuation des déblais sont envisageables. Une trousse coupante montée sur l'extrémité du chemisage, et abandonnée en place, permet éventuellement une finition de la coupe.

Le diamètre d'excavation de la tête est réglable et peut être ajusté en fonction de la pénétrabilité du chemisage et de la qualité de coupe. La recommandation des constructeurs est de ménager un espace annulaire centimétrique (au rayon) entre le chemisage et le terrain. Cet espace annulaire peut être obtenu par la trousse coupante ou par le réglage des taillants (à optimiser par des essais in situ).

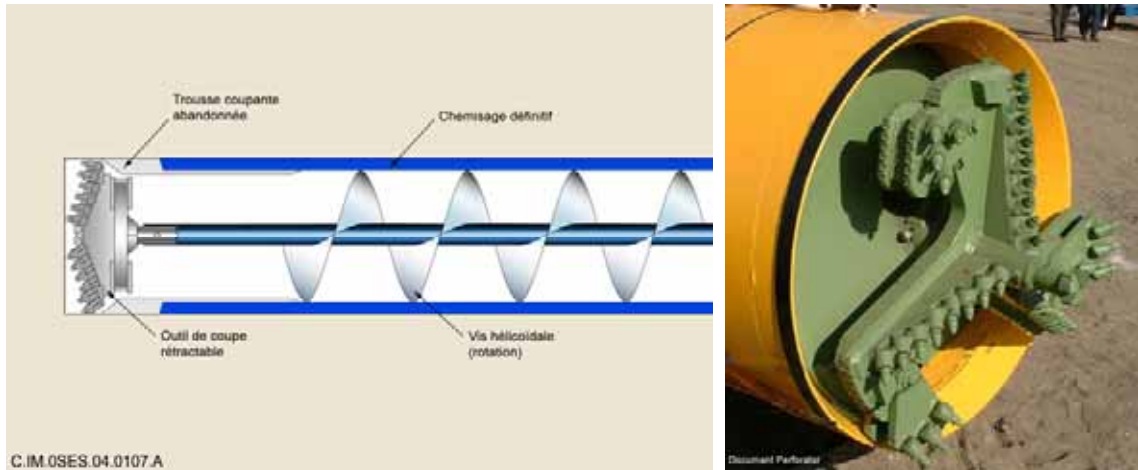


Figure 5.2.20 Vue de l'outil de coupe pour la réalisation des alvéoles C

- **Mise en place des tubes constituant le chemisage, partie permanente et partie provisoire**

Les éléments courants de chemisage sont positionnés à l'extrémité du tube déjà engagé et soudés juste avant leur introduction dans l'alvéole (par exemple soudage de type MIG ou MAG - Metal Inert Gas/ Metal Active Gas).

Les éléments de tube du chemisage provisoire peuvent quant à eux être connectés par verrouillage mécanique, ce qui permet un montage plus rapide et une récupération lors de la fermeture de l'alvéole.

Le chemisage provisoire se connecte au chemisage définitif par un emmanchement démontable à distance (simple emmanchement ou baïonnette).

- **Soudure de la plaque de fermeture du fond du chemisage et nettoyage**

Après retrait de l'outil de coupe, une plaque métallique est soudée en fond de chemisage ; l'opération est réalisée à l'aide d'un robot soudeur de conception analogue à ceux utilisés par l'industrie pétrolière (voir Figure 5.2.21).



Figure 5.2.21 Robot soudeur pour souder à l'intérieur du chemisage (photo Air Liquide)

● **Bilan de la solution de base**

La durée totale de réalisation de l'alvéole par foration est estimée à 7 postes de 8 heures (soit un total de 56 heures) se décomposant comme suit :

- montage/démontage du banc de poussée : 5 postes ;
- creusement de l'alvéole, hors connexion des tubes : 1 poste (sur la base de 40 m à 5 m/h) ;
- divers (connexion des tubes, nettoyage tube, etc.) : 1 poste.

5.2.5.3 Variante : micro-tunnelier et tubes de poussée laissés en place

Dans cette variante la tête d'un micro-tunnelier à motorisation hydraulique est poussée à l'aide du chemisage. Les particularités de cette variante sont les suivantes :

- l'outil de coupe est une roue pleine face, rétractable. La rotation de la roue de coupe est assurée par un moteur hydraulique ancré dans l'extrémité frontale du chemisage par des vérins latéraux (Figure 5.2.22) ;
- la solution par molettes pivotantes est préférée à la solution consistant à abandonner la périphérie de la roue de coupe dans le terrain (solution plus « propre » et plus économique) ;
- l'évacuation des déblais se fait de préférence par une vis sans fin.



Figure 5.2.22 Tête de micro tunnelier (photos CREATIV ALLIANCE / matériel ROBBINS)

La durée totale de réalisation de l'alvéole au micro-tunnelier est estimée à 9 postes de 8 heures (soit un total de 72 heures) se décomposant comme suit :

- montage/démontage du banc de poussée : 5 postes ;
- creusement de l'alvéole, hors connexion des tubes : 3 postes (sur la base de 40 m à 2 m/h) ;
- divers (connexion des tubes, nettoyage tube, etc.) : 1 poste.

5.2.6 Fermeture de l'alvéole

La fermeture de l'alvéole est réalisée par un bouchon qui assure une fonction de barrière hydraulique. Un dispositif est également mis en place pour assurer la protection radiologique du personnel dans la galerie d'accès.

Ce paragraphe présente d'abord les différents composants prévus pour réaliser ces fonctions ; il décrit ensuite plus précisément chacun d'entre eux et indique enfin leur mode de réalisation.

5.2.6.1 Principes de conception de la fermeture des alvéoles C

La limitation des possibilités de transport des éléments dissous repose sur la reconstitution d'un continuum de faible perméabilité autour des colis ; ce continuum est constitué de la formation géologique d'argilite et du bouchon à base d'argile gonflante.

Pour réaliser au mieux la fermeture hydraulique de l'alvéole, le bouchon doit avoir une perméabilité la plus faible possible. Trois éléments entrent en jeu : l'auréole d'argilite (potentiellement endommagée) au droit du bouchon, le bouchon à base d'argile gonflante et l'interface entre le bouchon et l'argilite. La conception vise à obtenir les meilleures propriétés hydrauliques de chacun de ces trois composants.

La préservation de la faible perméabilité de l'argilite autour des alvéoles demande de minimiser son endommagement et d'éviter, notamment, sa fracturation. Plusieurs dispositions conceptuelles ont été définies pour ce faire, comme indiqué plus haut (orientation, mode de creusement et de soutènement, positionnement de la zone d'implantation du bouchon hors de la zone endommagée de la galerie d'accès). Les endommagements attendus dans ces conditions ont été indiqués au § 5.2.3.5. La perméabilité de l'auréole d'argilite microfissurée autour des ouvrages est estimée à environ $5 \cdot 10^{-11}$ m/s [13]. Le fluage de l'argilite, si celle-ci s'appuie sur un corps limitant ses déplacements, peut de plus contribuer à une fermeture de la microfissuration réduisant la perméabilité.

La perméabilité du bouchon qu'il est possible d'obtenir est inférieure, ou au plus égale, à celle de l'argilite microfissurée. Une faible transmissivité de l'interface s'obtient par la déformabilité du matériau du bouchon et la pression de gonflement qu'il développe sur la paroi d'excavation. Ces éléments sont attestés en vraie grandeur, par l'essai dit TSX [67]. Il a mis en évidence une perméabilité équivalente de 10^{-11} m/s avec un matériau constitué d'argile gonflante Kunigel et de sable (20 %). L'Andra envisage une argile de type MX80, dont la perméabilité est plus faible. (voir section 7.6). Dans l'argilite, la pression de gonflement exercée par le bouchon après resaturation est susceptible de refermer la fracturation éventuelle.

Les dispositions précédentes permettent d'obtenir une perméabilité équivalente inférieure à celle de l'argilite microfissurée. En l'état actuel des connaissances, elle se situe à environ de 10^{-11} m/s. Une évolution vers une valeur plus faible (proche de 10^{-12} m/s) avec le fluage est probable, amenant la perméabilité équivalente du scellement d'alvéole à une valeur proche de 10^{-12} m/s.

5.2.6.2 Description de l'alvéole fermée

La description qui suit traite des trois composants suivants, dans l'ordre de leur mise en place : le bouchon métallique de fermeture, le bouchon d'argile et le massif d'appui ; elle précise les dimensionnements en rapport aux fonctions qu'ils ont à assurer.

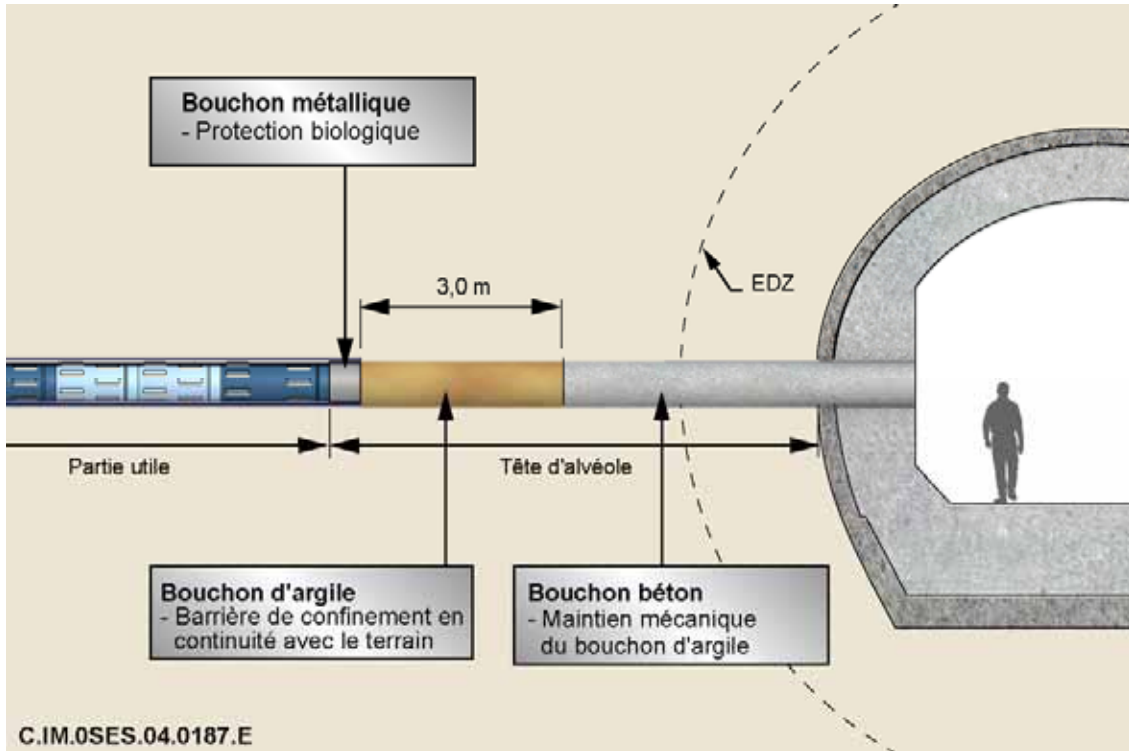


Figure 5.2.23 Principe de conception des bouchons d'alvéoles C

● Le bouchon métallique de fermeture

La fonction du bouchon métallique est d'assurer la protection radiologique lors des opérations de scellement de l'alvéole, de façon à s'affranchir de l'utilisation de la hotte de protection durant la mise en place de l'argile gonflante. Cette dernière peut ainsi s'effectuer par des procédés « non nucléaires », simples et fiables.

Un prédimensionnement a été réalisé pour limiter le débit de dose dans la galerie d'accès (niveau inférieur à $3 \mu\text{Sv/h}$). Le bouchon (voir Figure 5.2.24) peut être constitué d'un cylindre en acier, d'environ 50 cm de longueur (dont deux tiers consacrés à la protection biologique proprement dite et un tiers consacré à la préhension par les outils de manutention). Il pourrait être recouvert de céramique afin d'éviter tout phénomène de collage au chemisage (par corrosion).

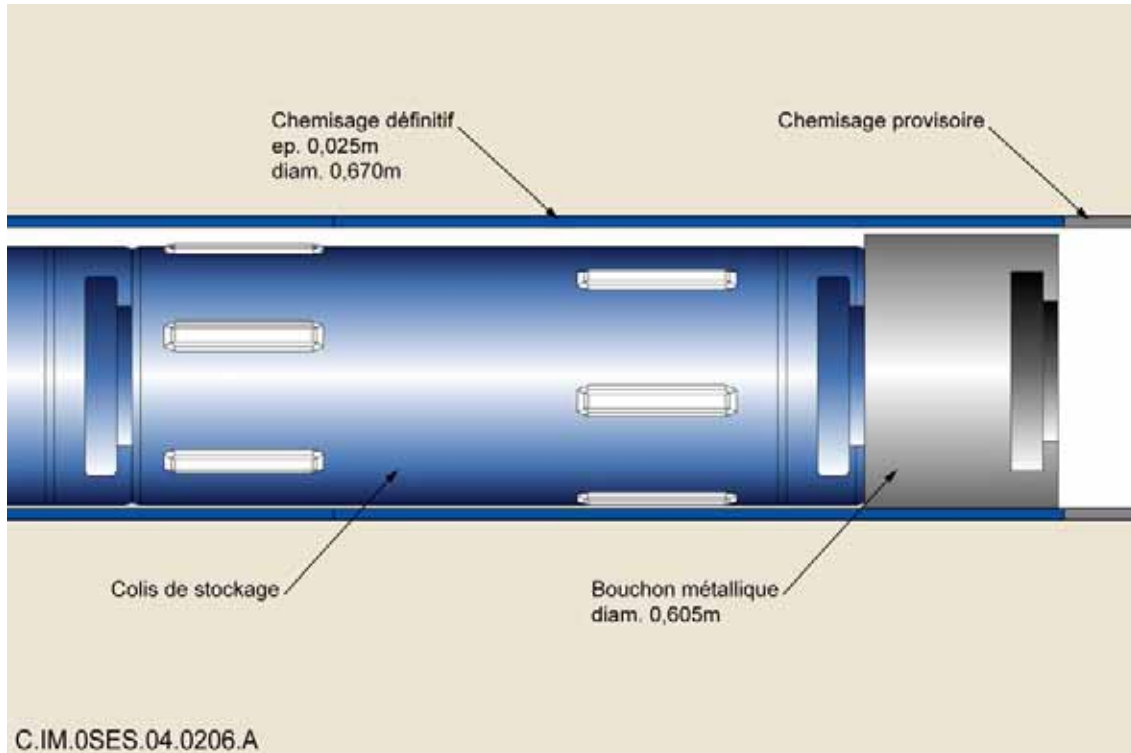


Figure 5.2.24 Bouchon métallique de l'alvéole C

● Le bouchon d'argile gonflante

Pour son rôle hydraulique, le matériau doit présenter une faible perméabilité et une bonne déformabilité. La mobilisation de ces propriétés n'exige pas de pressions de gonflement élevées. Des pressions modérées, quelques mégapascals, sont visées ; elles limitent la charge mécanique appliquée sur les appuis.

La description qui suit explicite les choix de conception effectués sur la pression de gonflement, l'argile gonflante et la composition du mélange ; le dimensionnement associé est présenté ensuite.

La pression de gonflement

La pression de gonflement doit se situer dans une fourchette de 1 à 13 MPa, et si possible dans une fourchette plus resserrée vers les valeurs basses pour les raisons exposées ci-dessous.

La valeur basse de 1 MPa permet de disposer d'une réserve de capacité de gonflement assurant l'étanchéité au contact de l'argilite. Elle couvre les incertitudes liées à la relaxation de l'argile consécutive à la dégradation du massif d'appui et au report au moins partiel de l'effort de confinement mécanique du bouchon d'argile sur le remblai de la galerie d'accès.

La valeur haute de 13 MPa correspond à la rupture par traction de l'argilite en paroi d'excavation (annulation de sa contrainte effective tangentielle) ; c'est donc une limite impérative. Une valeur inférieure à 7 MPa est souhaitée ; en effet, à terme, c'est la pression qui s'imposera, en équilibre avec les contraintes géostatiques radiales du site à 500 m de profondeur (à ces 7 MPa s'ajoutent les 5 MPa de pression interstitielle, conduisant à 12 MPa de contrainte totale) ; il est donc inutile de chercher à développer une pression de gonflement supérieure, cela ne conduirait qu'à solliciter inutilement les appuis avant de revenir à ce niveau de 7 MPa. Une pression plus faible est même de ce point de vue préférable, dès lors que le minimum de 1 MPa après relaxation reste assuré.

L'évolution de la pression de gonflement au cours du temps peut se résumer ainsi (Figure 5.2.25) : l'argile (ou le mélange) est mise en place avec son massif d'appui ; la resaturation du bouchon d'argile par les eaux interstitielles de l'argilite environnante y fait se développer la pression de gonflement, qui

atteint un premier maximum. À terme, une dégradation des matériaux d'appui peut induire une certaine relaxation. On a considéré le cas le plus pénalisant de ce point de vue : celui d'un déplacement « en piston » du massif d'appui à l'intrados du revêtement ; ce déplacement s'effectue sous la poussée de l'argile gonflante, supérieure à la réaction du remblai ; son expansion fait alors baisser la pression de gonflement. La réaction du remblai augmente, jusqu'à un état d'équilibre ; ce point d'équilibre correspond à un minimum de pression. In fine, le fluage de l'argilite remet l'ensemble du système à un deuxième maximum, égal à la contrainte géostatique effective (7 MPa).

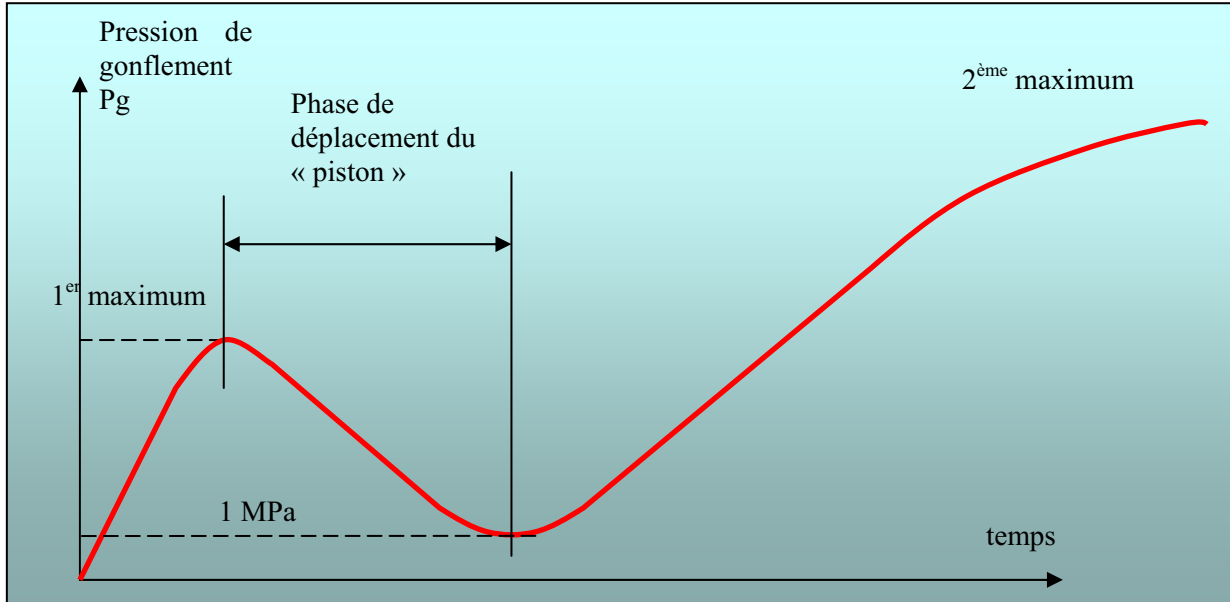


Figure 5.2.25 Principe de l'évolution de la pression de gonflement dans le bouchon d'argile gonflante

● Le choix de l'argile et de la composition du mélange

La déformabilité des argiles gonflantes disponibles d'un point de vue industriel est élevée ; elle le reste pour des mélanges d'argile et de sable, tant que le sable ne constitue pas un squelette continu (cela revient à limiter sa proportion à 50 % environ).

La pression de gonflement d'un matériau à base d'argile gonflante dépend de l'argile choisie, de la composition du mélange (proportion de matériau granulaire non gonflant), de la densité sèche de l'argile et de sa teneur en eau.

L'argile gonflante retenue aujourd'hui est du type « MX80 » (ou équivalent) en raison de faibles conductivités hydrauliques aux faibles densités sèches.

La relation entre densité sèche, teneur en eau et pression de gonflement fonde le dimensionnement de la pression de gonflement du bouchon d'argile décrit ci-après.

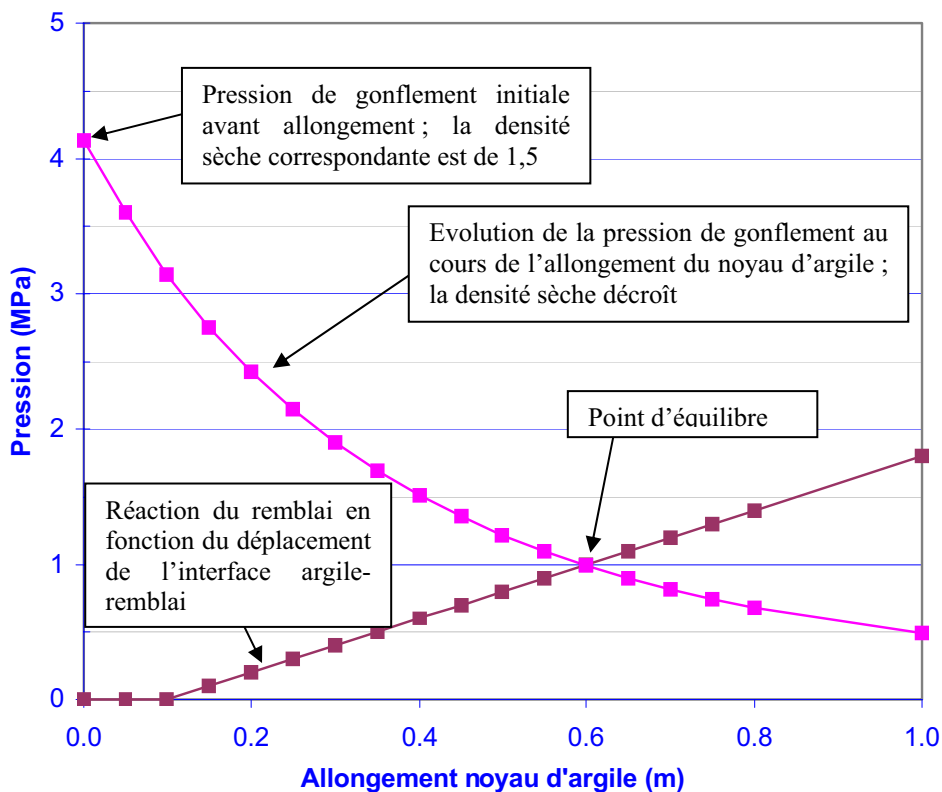
● Dimensionnement mécanique du bouchon d'argile

Une longueur du bouchon argileux d'environ 3 m assure, notamment, une protection de l'alvéole vis-à-vis d'une perturbation alcaline (pH). Le dimensionnement mécanique présenté ici vérifie que cette longueur est suffisante vis-à-vis de la relaxation possible de la pression de gonflement et des effets possibles à long terme de la perturbation alcaline.

Comme indiqué ci-avant, la pression de gonflement visée se situe entre un minimum de 1 MPa et un maximum (initial) n'excédant pas 7 MPa. Pour la perméabilité du bouchon d'argile (ou « noyau »), la fourchette visée est de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-11} m/s.

La méthodologie de calcul est illustrée à partir de l'exemple d'une argile gonflante de type MX80, sans prendre en compte l'effet du sable dans cette approche simplifiée.

La pression de gonflement maximale est déterminée sur la Figure 5.2.26. L'une des courbes représente l'évolution de la pression de gonflement de l'argile au cours de la dégradation du massif d'appui (le noyau d'argile, en gonflant, repousse l'appui que constituent le béton dégradé et le remblai, et par conséquent s'allonge). L'autre courbe représente la réaction d'appui du remblai. Cette réaction augmente au fur et à mesure du tassement du remblai. L'équilibre mécanique est atteint lorsque les deux courbes se croisent. La courbe représentant la pression de gonflement est calée en jouant sur la densité sèche initiale de manière à obtenir un équilibre à 1 MPa. Des hypothèses pessimistes ont été prises en compte quant à la déformabilité du béton dégradé et du remblai de la galerie d'accès. Le point d'équilibre avec le remblai s'obtient pour une pression de gonflement initiale, avant dégradation du béton, de l'ordre de 4,5 MPa (4,1 MPa lu sur la figure), correspondant à une densité sèche initiale de l'ordre de 1,5.



Equilibre entre poussée de gonflement du bouchon d'argile et réaction du remblai (béton dégradé) en supposant un déplacement de 0.1 m avant de solliciter le remblai et une raideur de 0.5 m/MPa (argile type MX80, sable non pris en compte)

Figure 5.2.26 *Equilibre entre poussée de gonflement du bouchon d'argile et réaction du remblai*

Un calcul analogue pour un mélange à 30 % de sable conduit à une densité sèche initiale⁸⁸ du mélange de l'ordre de 1,7 [65].

La densité sèche la plus basse au cours de l'évolution des matériaux est d'environ 1,4. Les résultats expérimentaux disponibles confirment que la MX80 présente une perméabilité inférieure à 10^{-12} m/s

⁸⁸ Ces valeurs sont les objectifs de densité sèche initiale d'une argile gonflante compactée en place, selon l'hypothèse envisagée actuellement pour la construction du bouchon. En cas de recours à des éléments d'argile gonflante préfabriqués, la densité sèche initiale devra être supérieure à ces valeurs afin de compenser la présence de vides de mise en place.

pour une telle densité, même mélangée à 30 % de sable. Cette conception préliminaire du bouchon d'argile gonflante répond donc aux besoins.

- **Le massif d'appui en béton**

La fonction du massif d'appui ou « bouchon de béton » est de s'opposer aux déformations du noyau d'argile gonflante. Pendant le développement de la pression de gonflement (lors de la resaturation du noyau), il offre au noyau une géométrie simple, qui favorise l'homogénéité de son évolution (déformation et perméabilité). La fonction durant cette phase transitoire est également de ralentir d'éventuelles venues d'eau susceptibles de créer des chenaux dans l'argile gonflante avant son gonflement. Durant cette phase, le bouchon de béton prend appui sur le terrain, par frottement, et sur le revêtement de la galerie d'accès⁸⁹.

À long terme, le matériau pourra subir une dégradation chimique qui réduira ses propriétés mécaniques. Le massif d'appui restera toutefois un relais entre le bouchon d'argile gonflante et le remblai de la galerie d'accès. Il contribuera donc encore au confinement mécanique de l'argile gonflante, et au maintien de faibles conductivités hydrauliques.

5.2.6.3 Dispositions constructives pour la fermeture d'un module de stockage

La fermeture d'un module de stockage de déchets C fait intervenir cinq étapes : (i) mise en place du bouchon métallique de protection biologique dans chaque alvéole, (ii) dépose du chemisage provisoire, (iii) mise en place du bouchon d'argile gonflante, (iv) mise en place du massif d'appui et (v) remblaiement des galeries d'accès. Ces diverses étapes sont décrites ci-dessous.

- **Mise en place du bouchon métallique de protection biologique**

Le bouchon métallique est mis en place par le même équipement que celui utilisé pour la mise en place de l'alvéole des colis de stockage (cf. chapitre 9). Cette opération peut s'effectuer après la mise en place du dernier colis.

- **Démontage du chemisage provisoire**

Lorsque la fermeture de l'alvéole est décidée, la dépose du chemisage provisoire permet d'obtenir un contact direct entre le bouchon d'argile gonflante et la roche⁹⁰. Un certain nombre de précautions sont à prendre, pour ne pas endommager l'argilite au droit de la zone de scellement.

En particulier, il est a priori préférable de ne pas laisser le terrain sans support mécanique au cours de cette opération : il est donc envisagé de mettre en place le noyau d'argile gonflante au fur et à mesure du retrait du chemisage, ou très peu de temps après. En outre, afin d'exercer un support immédiat, l'argile gonflante doit être mise au contact du terrain : la compaction in situ de pellets d'argile ou de mélange pellets/poudre est donc aujourd'hui préférée à la mise en place de blocs préfabriqués qui nécessite des jeux.

En ce qui concerne la protection biologique, le bouchon métallique l'assure dans l'axe de l'alvéole, les rayonnements obliques sont quant à eux arrêtés par l'argilite au droit de la future zone de scellement.

- **Mise en place du bouchon d'argile gonflante**

Comme indiqué ci-avant, une mise en place par compactage in situ est privilégiée pour réaliser un contact immédiat entre le terrain et le noyau d'argile gonflante.

⁸⁹ Le dimensionnement préliminaire du bouchon de béton néglige le frottement sur le terrain : l'intégralité de la charge est reprise par le revêtement de la galerie. Ce prédimensionnement est fondé sur une pression d'argile gonflante de l'ordre de 4 MPa. Afin de pouvoir mobiliser le frottement dans l'argilite, lors de dimensionnements plus complets sous une charge plus élevée, la longueur du bouchon de béton a été fixée provisoirement à 1 rayon de galerie d'accès ; il est rappelé que le bouchon d'argile gonflante doit être positionné hors zone endommagée, soit à au moins 0.5 rayon de la galerie d'accès

⁹⁰ Le démontage du chemisage provisoire peut s'effectuer longtemps après la mise en place du bouchon métallique. Dans ce cas, un capot d'étanchéité est mis en place pour éviter le renouvellement d'oxygène dans l'alvéole.

L'argile est constituée d'un mélange de pellets de granulométrie variable, ce qui favorise le compactage. La mise en place initiale est réalisée par exemple par voie pneumatique ou par vis d'Archimède. Des densités sèches supérieures à 1,4 sont accessibles par de telles méthodes, sans compactage. Un piston peut compléter la compaction si l'on veut atteindre des densités plus élevées (voir Figure 5.2.27).

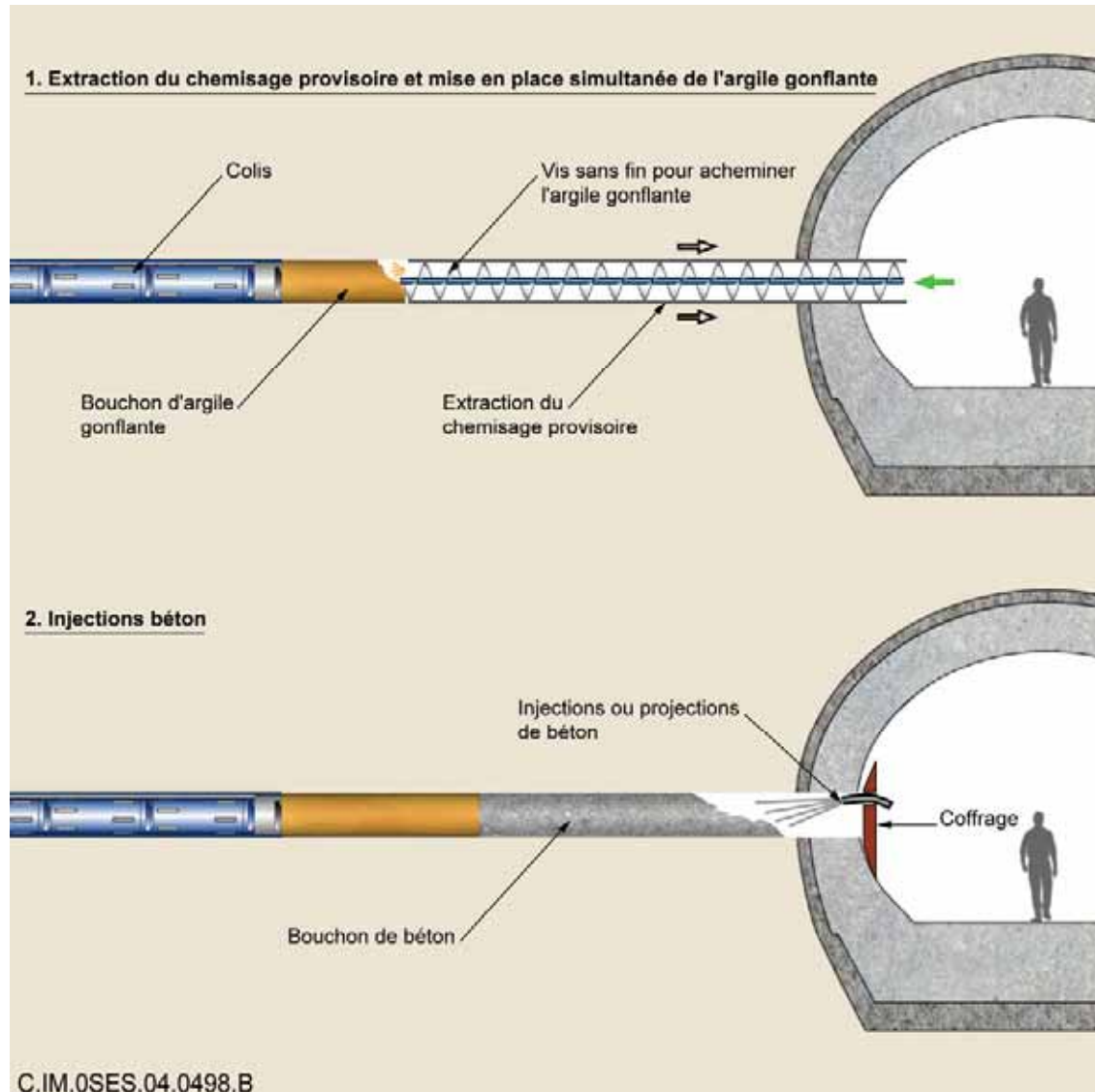


Figure 5.2.27 Principe du démontage du chemisage et de la mise en place simultanée du bouchon d'argile gonflante (alvéole C)

- **Mise en place du massif d'appui**

Dernière étape de la fermeture d'une alvéole, la mise en place du bouchon de béton peut se faire par coulage derrière un coffrage vertical muni d'un évent. Elle peut également être réalisée par la méthode du béton projeté ; cette deuxième solution fait aujourd'hui l'objet d'un programme de démonstration dans le cadre du projet européen ESDRED (Engineering Studies and Demonstration of Repository Design).

- **Mise en place du remblai de la galerie d'accès**

Lorsque toutes les alvéoles d'un module de stockage sont fermées, il peut être décidé de remblayer les galeries d'accès (voir le chapitre 10). Le remblai des galeries d'accès assure la fonction de base de tout remblai : limiter à long terme l'extension de la zone endommagée d'argilite autour de la galerie. Au

droit des alvéoles, comme indiqué précédemment, il doit aussi pouvoir assurer un rôle de remblai d'appui, c'est-à-dire résister au déplacement des massifs d'appui des bouchons d'alvéole, en cas de dégradation de ces massifs.

Cette dernière fonction justifie de réaliser ce remblai comme les remblais d'appui de scellement de galerie (cf. section 7.6). Ce remblai pourrait être constitué d'un mélange d'argilite excavée préparée (rebroyée et criblée à environ 20 mm) et de sable, en proportions voisines. Il peut être mis en place, en partie inférieure de la galerie, par couches horizontales (de 20 à 30 cm d'épaisseur) compactées ; en partie supérieure par couches inclinées ; pour ces dernières, un compactage à l'aide d'une dame pneumatique est envisagé. Une injection (pneumatique) de bentonite en poudre peut s'effectuer pour améliorer le clavage. Ces méthodes permettent d'obtenir une densité sèche moyenne en place de l'ordre de 1,7 ; cette valeur est compatible avec les caractéristiques visées (module de déformation de 20 MPa et angle de frottement interne de 40°).

En première approche, l'ensemble de la galerie d'accès pourrait être remblayée de cette façon. Des essais de démonstration de remblais, en cours, pourront ouvrir la voie à des optimisations : alternance de remblais d'appuis, sur quelques mètres au droit des alvéoles, et de remblais courants (sans sable).

5.3 Les modules de stockage de combustibles usés

Les combustibles usés ne sont pas actuellement considérés comme des déchets. Leur accueil éventuel dans un stockage en formation géologique profonde a néanmoins été examiné. La faisabilité du stockage est ainsi appréciée vis-à-vis de divers scénarios considérés pour la gestion de l'aval du cycle électronucléaire.

Ce chapitre décrit les alvéoles de stockage de combustibles usés, leur équipement et leur agencement les unes par rapport aux autres. Les principaux choix de conception sont examinés par comparaison avec ceux des alvéoles de déchets C. Pour les combustibles usés CU1 et CU2, dont la puissance thermique est élevée, et pour lesquels la décroissance thermique est lente, la solution de référence est une alvéole avec barrière ouvragée à base d'argile gonflante ; la présentation qui suit se focalise sur cette solution. Les CU3 présentent une moindre puissance thermique. Une gestion à part de ces combustibles laisse toute latitude pour des optimisations spécifiques. Compte tenu de leur faible puissance thermique, le stockage des combustibles usés de type CU3 est envisageable dans des alvéoles analogues à celles décrites plus haut pour les déchets type C0.

5.3.1 Exposé des questions principales

Les modules de combustibles usés doivent accueillir les colis des différents types, dans des zones distinctes. Cette séparation permet de tenir compte de leur spécificité vis-à-vis du comportement thermique.

Les besoins dimensionnants sont globalement similaires à ceux des déchets C. Ils concernent notamment la gestion des puissances thermiques dégagées et la limitation des possibilités de transport au voisinage immédiat des combustibles. Ce dernier point vise à limiter la dissolution des pastilles de combustible par le contrôle de la solubilité de leurs constituants.

Pour les colis types CU1 et CU2, une autre question est la masse et les dimensions particulièrement importantes des colis (qui induisent des contraintes de manutention).

Enfin, les combustibles usés posent le problème de la maîtrise de la criticité, du fait du contenu en matière fissile. Le maintien de conditions sous-critiques est assuré par la conception des colis de stockage (voir le chapitre 4).

5.3.1.1 Gestion du dégagement thermique

Les produits de fission et les actinides sont à l'origine du dégagement thermique des colis de combustibles usés. Ce dégagement décroît en fonction de la période radioactive des radionucléides. La présence en grande quantité d'actinides peut induire une décroissance thermique plus lente que pour les déchets C (cas des colis de type CU1 et CU2). Les combustibles usés CU3 se situent au contraire à

un niveau plus proche des C0, moyennement thermiques. Ces considérations conduisent à stocker dans des zones distinctes les différents types de combustibles usés

Deux critères thermiques sont à respecter, comme pour les déchets C :

- le premier critère consiste à maintenir dans l'alvéole une température inférieure à 100 °C (l'alvéole reste ainsi dans un domaine où les phénomènes couplés thermo-hydro-mécaniques-chimiques sont connus et compris). Comme pour les alvéoles C et pour les mêmes raisons de gestion des incertitudes de modélisation, ce critère se traduit par une température en paroi d'argile ne devant pas dépasser 90 °C. Le critère, localisé en paroi d'argilite dans le cas des alvéoles de déchets C, est positionné en paroi (intérieure) de la barrière ouvragée argileuse dans le cas des alvéoles de combustibles usés ;
- le second critère vise à éviter des transformations minéralogiques significatives de l'argilite, et surtout de l'argile gonflante de la barrière ouvragée, qui nuiraient à sa capacité de gonflement (transformation des smectites, gonflantes, en illites, non gonflantes). Comme pour les alvéoles de déchets C, on vérifie que la température redescend au dessous de 70 °C à l'échelle du millier d'années.

5.3.1.2 Un environnement physico-chimique favorable aux colis

L'environnement proche des colis doit constituer une barrière hydraulique diffusive (matériaux homogènes, peu perméable et aux coefficients de diffusion aussi faibles que possible), de façon que l'alvéole fonctionne en système chimique fermé. Cette situation assure un équilibre chimique entre les composants des colis (enveloppes, pastilles de céramique constituant le combustible) et l'eau à leur contact. Elle permet de limiter l'altération des colis et des assemblages.

Le pH doit être maintenu dans la fourchette 6-9, domaine de validité des modèles utilisés pour la dissolution des pastilles.

Ces propriétés sont apportées conjointement par la barrière ouvragée argileuse et l'argilite environnante (solution de référence pour les alvéoles CU1 et CU2) ou par l'argilite préservée de l'endommagement, pour l'alvéole sans barrière ouvragée argileuse (CU3).

5.3.2 Principes de conception retenus

Les paramètres clés pris en compte sont les mêmes que pour les déchets C. Les alvéoles sont borgnes (maîtrise de la circulation d'eau), à une seule file de colis dans la section (dissipation de la chaleur dégagée par les colis) ; elles sont implantées dans une tranche médiane de la formation (préservation des gardes d'argilite non perturbée).

Les principales questions pour la conception portent sur l'orientation (horizontale ou verticale) des alvéoles, la présence ou non d'une barrière ouvragée, sa mise en place (intégrée au colis ou de façon distincte du colis), le choix de la section (au plus près du colis ou ménageant un espace de manutention et de ventilation) et le choix des matériaux (béton ou acier, pour les revêtements ; béton ou argile gonflante, pour la barrière ouvragée).

5.3.2.1 Plusieurs solutions envisagées

Les différentes solutions envisagées sont résumées par les illustrations suivantes (Figure 5.3.1 à Figure 5.3.3).

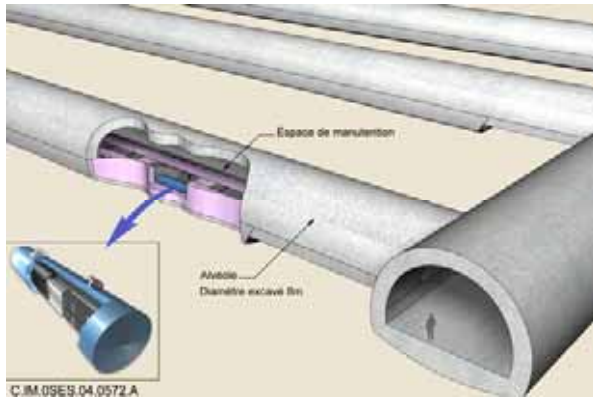


Figure 5.3.1 Concept de « galerie de stockage »

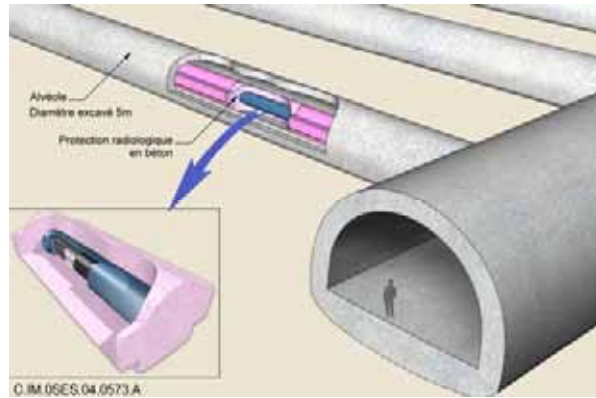


Figure 5.3.2 Concept de « super-conteneur en galerie »

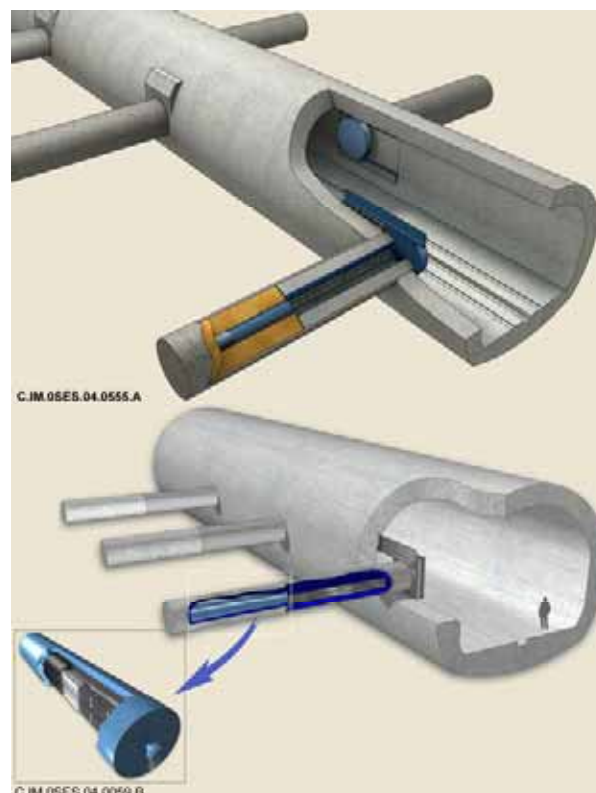
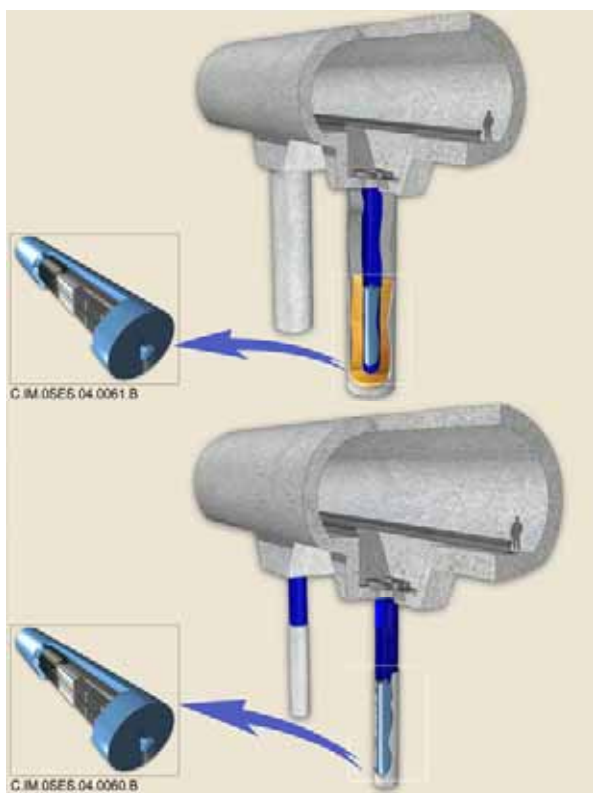


Figure 5.3.3 Concepts puits et tunnels courts pour les combustibles usés

5.3.2.2 Comparaison des solutions envisagées et justification du choix

- **Comparaison avec ou sans barrière ouvragée argileuse**

Après dégradation du conteneur des combustibles usés, la maîtrise du relâchement des radionucléides repose essentiellement sur l'existence d'une barrière diffusive autour des colis et sur les caractéristiques physicochimiques des constituants des combustibles usés (pastilles d'oxyde d'uranium et structures). De plus, par rapport aux déchets C, la décroissance de l'activité thermique des combustibles usés est plus lente, du fait des actinides présents en quantité. Pour se prémunir contre les effets thermo-hydro-mécaniques (THM) sur les argilites pendant des durées supérieures à 1 000 ans, il a été estimé préférable de recourir à une barrière ouvragée argileuse⁹¹. Celle-ci apporte de la

⁹¹ Le béton n'a pas été retenu comme matériau de barrière ouvragée pour deux raisons : sa perméabilité et le pH basique qu'il induit. Sa perméabilité ne peut être rendue aussi faible que celle de l'argile gonflante et ne peut être maintenue à son niveau initial, du fait de la

robustesse vis-à-vis d'un possible endommagement lié à ces effets THM à long terme. Sa plasticité lui permet de cicatriser sa propre fissuration. Les études ont en effet montré qu'elle retrouvait, après une phase thermique, ses propriétés de plasticité, de gonflement et de faible perméabilité.

- **Comparaison « alvéoles horizontales – alvéoles verticales »**

La comparaison des configurations horizontales et verticales a conduit, comme pour les déchets C, à donner la préférence à la configuration horizontale. Elle offre des perspectives d'optimisation du dimensionnement thermique et de réduction du volume excavé.

- **Comparaison « alvéole de stockage – galerie de stockage »**

L'option « alvéole de stockage » se caractérise par un diamètre adapté à celui du colis de stockage ; l'option « galerie de stockage » dispose d'un espace supplémentaire de manutention et de ventilation. Comme pour les déchets C, la préférence est donnée à l'alvéole. La galerie de stockage est, en effet, pénalisée par un volume excavé significativement accru. De plus, les possibilités de ventilation qu'elle offre valent pour la phase d'exploitation et non pour la phase post fermeture (la dissipation de l'énergie thermique des colis doit s'y effectuer de façon purement passive). On notera enfin que l'utilisation de béton au voisinage des combustibles usés n'apparaît pas favorable à ce stade (pH basique, risque d'augmentation de la perméabilité à long terme).

5.3.2.3 La solution retenue

L'alvéole de stockage de combustibles usés présente de nombreuses similitudes avec l'alvéole pour déchets C. Elle en diffère principalement par la présence d'une barrière ouvragée qui conduit à augmenter son diamètre (environ 3,3 m pour les CU1 et de 2,6 m pour les CU2).

Comme pour les alvéoles de déchets, des intercalaires permettant d'espacer les colis permettent de mieux répartir la chaleur dans la roche.

Les différentes composantes de l'alvéole de combustibles usés et leurs fonctions associées sont illustrées dans le schéma de la Figure 5.3.4 et le Tableau 5.3.1.

dégradation du matériau (d'origine chimique et thermique). Le béton impose à son voisinage un pH basique ; il serait hors du domaine de validité du modèle de dissolution des combustibles usés actuellement disponible (pH 6 à 12).

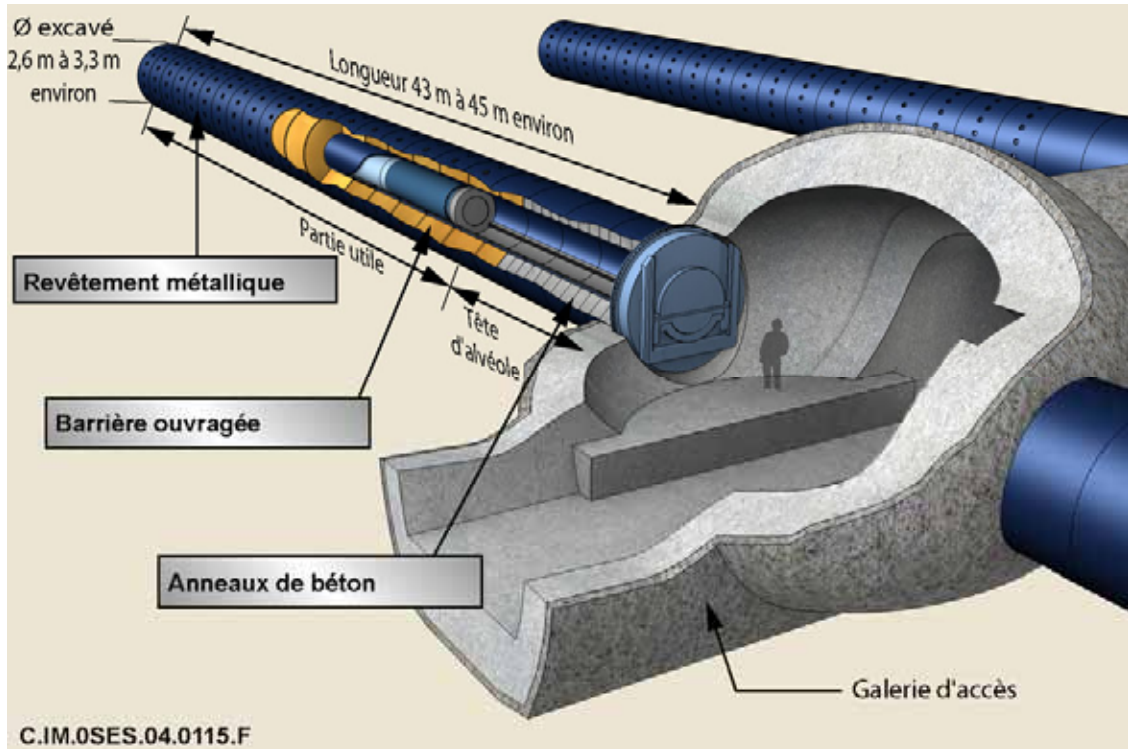


Figure 5.3.4 *Alvéole de combustible usé : principaux composants*

Tableau 5.3.1 fonctions et principaux composants de l'alvéole de combustibles usés

Fonctions	Période	Chemisage métallique	Barrière ouvragée en argile gonflante	Bouchon et operculaire métalliques	Bouchon d'alvéole	Intercalaires	Scellement de module	Remblai de la galerie d'accès
Transférer les colis jusqu'à leur emplacement de stockage	Exploitation	X						
Soutenir mécaniquement les ouvrages	Exploitation et observation	X						
Protéger les personnes contre l'irradiation	Exploitation et observation		x	X	x			
Permettre de récupérer les colis de stockage	Exploitation et observation	X		x				
S'opposer à la circulation d'eau	Après fermeture		x		x		X	
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Après fermeture	x	X		X			
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Après fermeture		x		x			
Limiter les déformations mécaniques dans les argilites du Callovo-Oxfordien	Après fermeture	x	x		x	x	x	X
Dissiper la chaleur	Toutes	x	x			X		
Fractionner le stockage	Après fermeture						X	

Légende : **X** composant essentiel dans la réalisation d'une fonction
 x contribution d'un composant à une fonction

5.3.2.4 Les solutions adoptées ou à l'étude à l'étranger

Le stockage direct de combustibles usés dans des formations argileuses est étudié en Belgique et en Suisse. Les concepts américain (Yucca Mountain), suédois et finlandais peuvent aussi être mentionnés, bien que correspondant à des contextes géologiques différents.

● Belgique

Le concept de stockage direct des combustibles usés étudié par l'ONDRAF est présenté, dans le rapport SAFIR2 (2001), comme une adaptation de celui pour déchets vitrifiés. Depuis cette date, le concept a évolué.

Le colis de stockage consiste en un conteneur en acier inox (AISI 316), accueillant, dans un étui, un seul assemblage, pour des raisons de criticité.

Les alvéoles sont des tunnels horizontaux de section circulaire de 2,70 m de diamètre et de 600 à 800 m de longueur. Elles sont revêtues d'un revêtement en béton de 25 cm d'épaisseur et sont équipées de 4 tubes longitudinaux espacés par de l'argile gonflante dans le cas des colis UOX, ou d'un

seul tube central dans le cas des colis MOX. Les critères thermiques de dimensionnement sont une température inférieure à 100 °C en paroi de conteneur et une élévation de température de la formation géologique aquifère de couverture inférieure à 6 °C. La durée supérieure de la phase thermique pour les combustibles usés conduit à porter l'entraxe d'alvéoles à 110 m (au lieu de 40 m pour le concept belge de déchets vitrifiés).

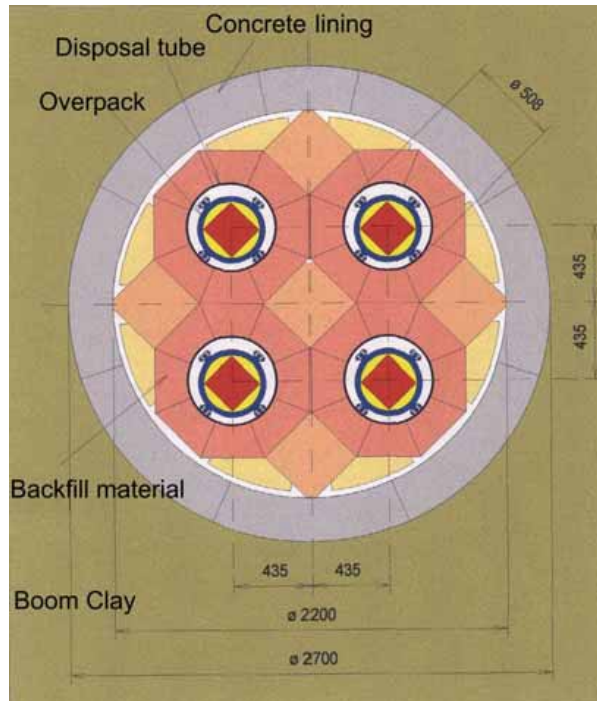


Figure 5.3.5 Concept ONDRAF pour le stockage des combustibles usés, coupe transversale d'après SAFIR 2

● Suisse

La Nagra envisage pour les combustibles usés un concept similaire à celui des déchets vitrifiés dont une description succincte a été présentée au § 5.2.2.3. Le descriptif détaillé du concept de la Nagra est disponible dans son Technical Report [44]. Le colis de stockage est un conteneur en acier ou en cuivre, présenté au § 4.3.2.4.

Les alvéoles sont orientées selon la contrainte majeure. Les caractéristiques mécaniques de la formation considérée (argile à Opalinus) font escompter dans ces conditions que les excavations seront autostables : elles ne sont pas revêtues ; seul un soutènement par grillage et boulons est prévu, pour des raisons de sécurité. Les alvéoles sont « passantes ». Leur diamètre est de 2,50 m et leur longueur de plusieurs centaines de mètres. Les colis de stockage sont posés sur des plots en argile gonflante compactée. L'espace annulaire compris entre le colis et les parois de l'alvéole est rempli par projection d'un mélange de pellets et de poudre, faiblement compacté (densité sèche visée de 1,5). Le remplissage de l'alvéole s'effectue par cycle alternant la mise en place d'un colis et celle de la barrière ouvragée.

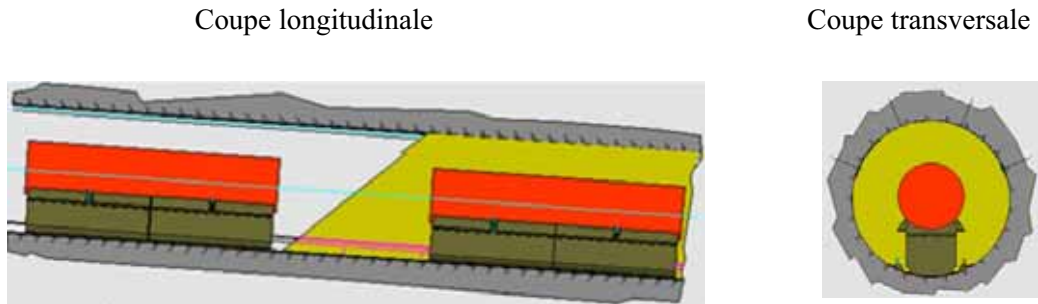


Figure 5.3.6 Concept Nagra (Suisse) pour le stockage des colis de combustibles usés

● **Suède et Finlande**

Les concepts suédois (SKB) et finlandais (Posiva) sont conçus pour des roches granitiques. La description complète du concept suédois KBS-3V figure dans [68], pp 63-66. Le concept finlandais fait référence au concept suédois.

Les assemblages sont placés, par 4 ou par 12, dans un conteneur en cuivre de 1,05 m de diamètre et de 50 mm d'épaisseur, équipé d'un insert en fonte. Les alvéoles sont des puits verticaux de 1,75 m de diamètre, accueillant un seul conteneur entouré et surmonté d'argile gonflante MX80.

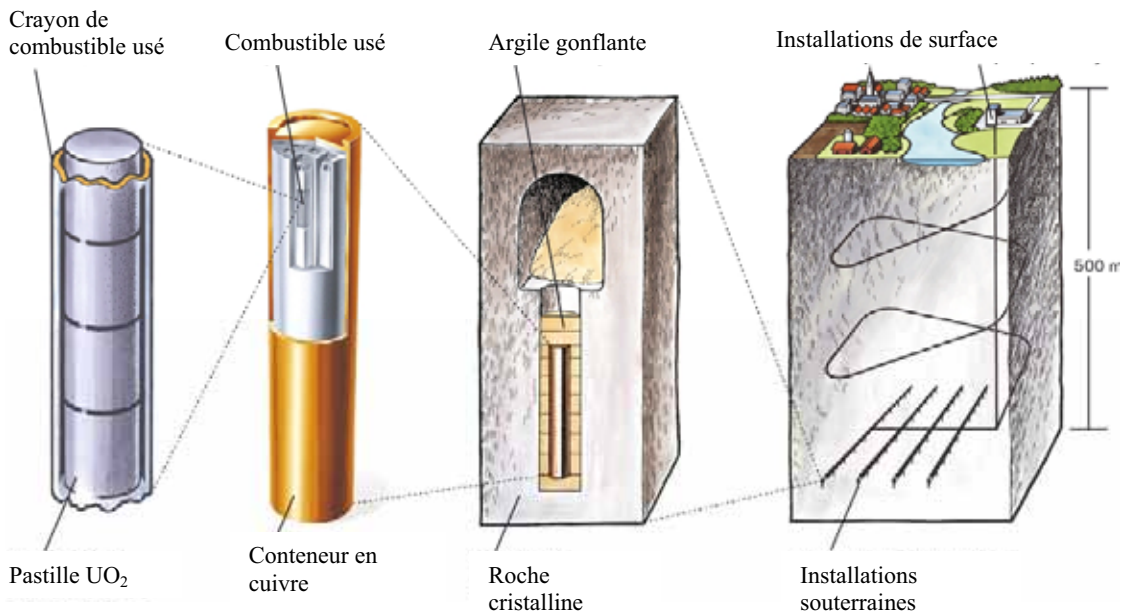


Figure 5.3.7 Concepts suédois et finlandais avec alvéoles verticales (KBS-3V)

SKB et Posiva étudient actuellement une variante horizontale (KBS-3H) dont le principe repose sur l'utilisation d'un super-conteneur constitué du conteneur en cuivre entouré d'une barrière ouvragée en argile gonflante préfabriquée. Ces super-conteneurs sont mis en place dans des galeries de stockage de plusieurs centaines de mètres de longueur. Cette variante vise à réduire de façon significative le linéaire de galeries d'accès.

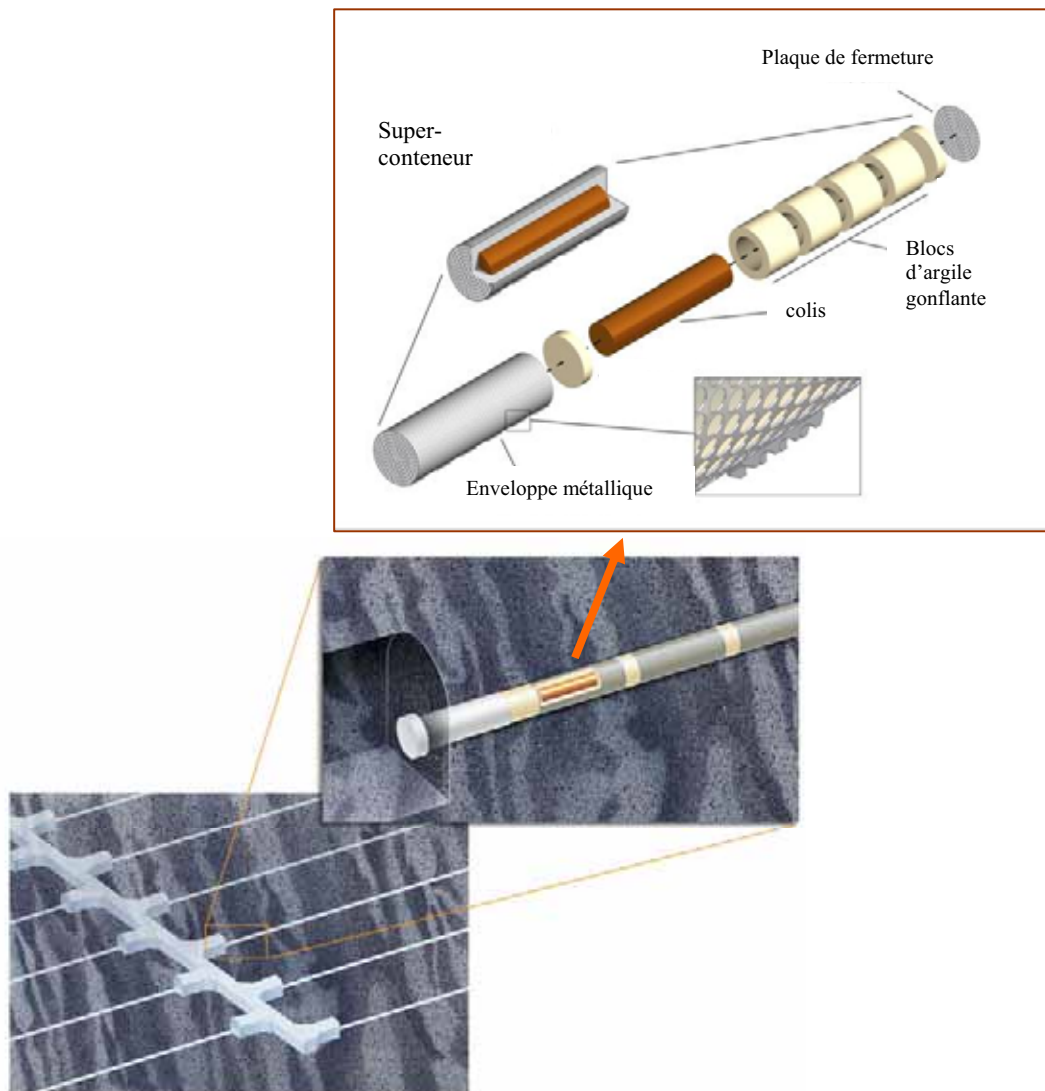


Figure 5.3.8 Concept horizontal KBS3-H avec super-conteneur (SKB, Suède) : en haut, le super-conteneur; en bas, les alvéoles horizontales.

● USA

Le projet américain de Yucca Mountain est dédié aux combustibles usés civils et de défense. La formation géologique est un tuf volcanique. Les alvéoles de stockage sont des galeries horizontales « passantes » de 5,5 m de diamètre et de 970 m de long [69]. Les colis y sont placés à la file, sans barrière ouvragée, mais en position surélevée et sous un « bouclier parapluie » (drip shield) en titane, de façon à les protéger des percolations locales (eaux météoriques) et de la corrosion localisée induite.

La spécificité de ce concept par rapport à tous les autres projets réside dans le fait que la chaleur produite par les colis est évacuée par une ventilation forcée qui balaye la totalité du linéaire des galeries de stockage pendant une période de 69 ans. Les galeries à l'issue de la mise en place des colis ne sont pas remblayées. Le scellement des ouvrages est réalisé au-delà d'une période d'environ 100 ans.

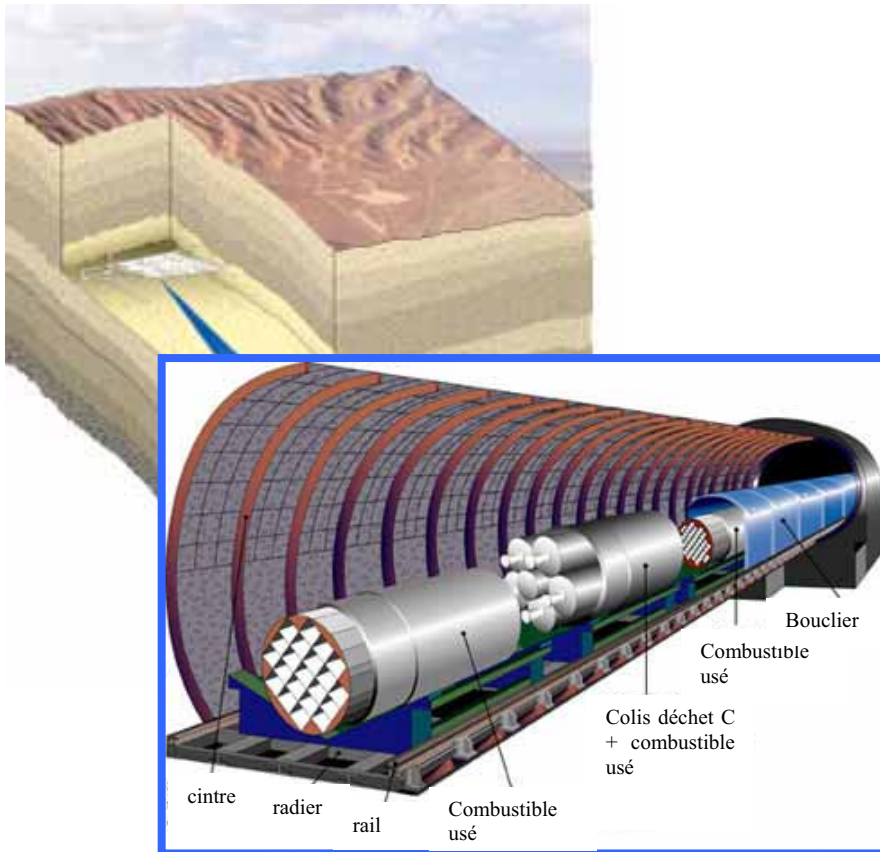


Figure 5.3.9 Concept de stockage du Projet Yucca Mountain (Etats-Unis)

● Comparaison des concepts pour le stockage des combustibles usés

Le concept Andra retenu pour la présente étude de faisabilité partage un point commun avec tous les projets étrangers en milieu saturé au moins : la présence d'une barrière ouvragée en argile gonflante. Le seul projet ne faisant pas appel à une telle barrière ouvragée, Yucca Mountain, se situe dans une formation désaturée.

Dans les concepts belge (SAFIR 2), suédois et finlandais (KB3-V), la barrière ouvragée est mise en place au moment de la construction de l'alvéole. La mise en stockage du colis n'est réalisée que postérieurement à cette opération d'une façon comparable au concept Andra présenté.

En revanche, le concept suisse est fondé sur le principe d'une opération de construction combinée avec la mise en stockage des colis : la mise en place de la barrière ouvragée est réalisée après la mise en stockage de chaque colis ; lorsque ce dernier est entièrement entouré de bentonite, un nouveau colis est mis en place. Ce concept présente, par rapport au concept Andra, l'avantage d'éviter l'utilisation d'un chemisage métallique. En revanche, il présente l'inconvénient de conduire simultanément des opérations de type « génie civil » et des opérations de manipulation de matières nucléaires irradiantes. L'Andra a préféré, à ce stade des études, dissocier les opérations de construction des opérations d'exploitation nucléaire.

Le nouveau concept suédois/finlandais actuellement à l'étude (KBS3-H) est du type « super-conteneur ». Il présente l'avantage de pouvoir préfabriquer en atelier un continuum de barrière ouvragée autour de chaque colis, mais rend plus complexe le retrait des colis. En effet, contrairement au concept Andra où les colis peuvent, dans une première étape (avant scellement de l'alvéole), être retirés comme ils ont été mis en place, le concept « super-conteneur » implique de développer des méthodes spécifiques pour le retrait des colis.

On notera enfin que le concept Yucca Mountain, du fait de la ventilation forcée parcourant les galeries où sont stockés les colis, est peu comparable aux autres concepts. En outre, les conditions d'environnement des colis stockés sont différentes, la formation géologique d'accueil n'étant pas saturée.

5.3.3 Description et dimensionnement des modules CU1 et CU2

Cette section présente les modules CU1 et CU2, les modules CU3 sans barrière ouvragée argileuse étant, dans leur principe, identiques à celles décrites pour les déchets C à la section 5.2.

5.3.3.1 Description de l'alvéole et de la galerie d'accès

La description qui suit met l'accent sur les spécificités de l'alvéole de combustible usé. Les traits communs avec l'alvéole de déchets C sont brièvement rappelés.

● Description de l'alvéole

L'alvéole, telle que conçue à ce stade des études, est un tunnel borgne de diamètre d'environ 3,3 m pour l'alvéole de CU1 et 2,6 m pour l'alvéole de CU2.

Dans sa partie utile, recevant les colis, l'alvéole est constituée de trois composants : un revêtement métallique en acier, une barrière ouvragée à base d'argile gonflante, de 800 mm d'épaisseur radiale, et un chemisage métallique permanent (maintenu après fermeture). Le chemisage facilite la mise en place ou le retrait des colis.

La tête d'alvéole est destinée à recevoir un scellement. Ce dernier est constitué d'un bouchon d'argile et d'un massif d'appui en béton. Les parties périphériques de ce dernier (argile et béton), sont mises en place à la suite de la barrière ouvragée, avant les colis. L'espace central permet le passage des colis, il reçoit à cet effet un chemisage provisoire, déposé pour la fermeture de l'alvéole.

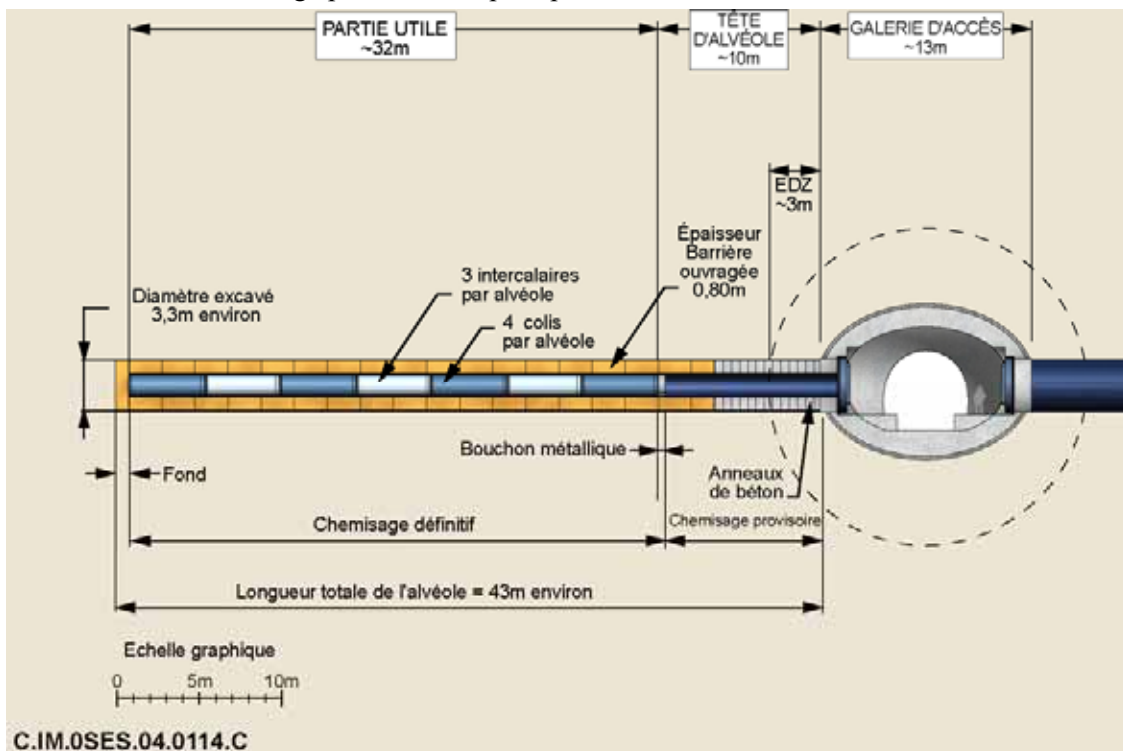


Figure 5.3.10 Coupe longitudinale de l'alvéole CU1

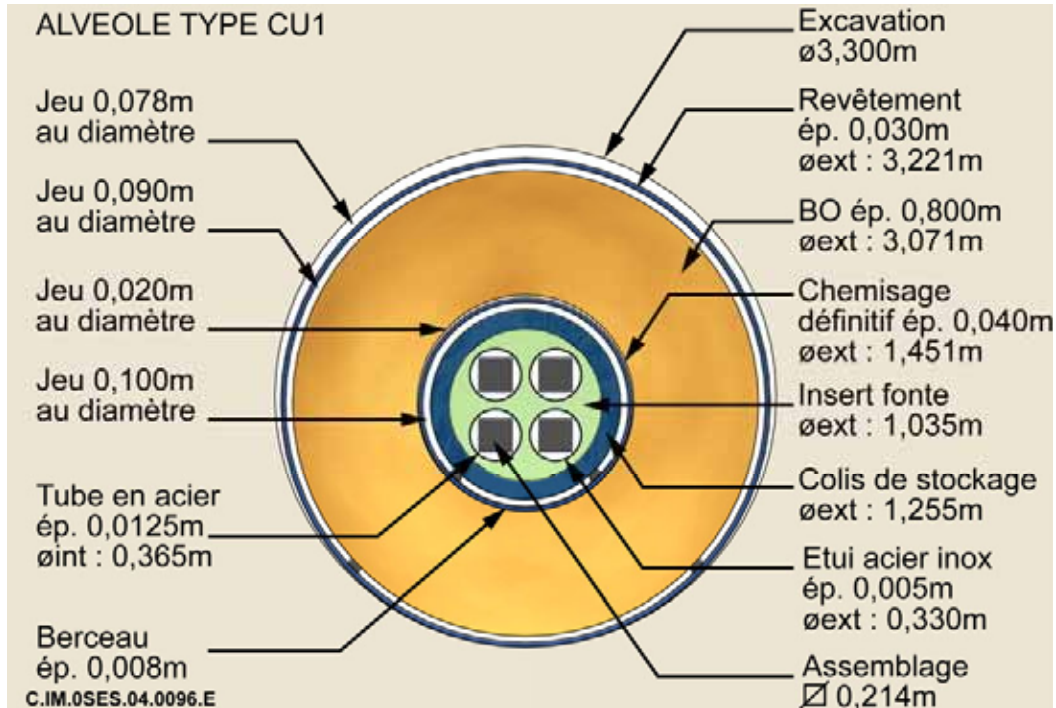


Figure 5.3.11 Coupes transversales des alvéoles de combustibles usés CU1

● Les composants et les fonctions de la partie utile de l'alvéole

Le revêtement métallique assure les trois fonctions suivantes : soutien mécanique de l'argilite, protection du personnel et, lors du creusement, tube de poussée. Le diamètre supérieur des alvéoles CU1 conduit dans ce cas à porter son épaisseur à 30 mm, contre 25 mm pour l'alvéole CU2. Le revêtement métallique est perforé pour permettre le passage de l'eau et la resaturation de la barrière ouvragée.

La barrière ouvragée argileuse est constituée d'argile gonflante (environ 70 %) et de sable (environ 30 %) sous forme d'anneaux préfabriqués.

Trois grandes phases peuvent être distinguées, et analysées à la lumière des fonctions que la barrière ouvragée argileuse assure ou auxquelles elle contribue. Ces fonctions sont la constitution d'une barrière diffusive (protégeant les colis de l'altération aqueuse) et la dissipation de la chaleur dégagée par les colis (et son transfert à l'argilite) [13].

Dans la **phase 1**, lors des premières dizaines d'années, la barrière ouvragée argileuse, non saturée, n'a pas à jouer son rôle de barrière diffusive (le conteneur empêche le retour de l'eau sur les combustibles). La barrière ouvragée argileuse, en revanche, doit permettre d'évacuer le flux thermique encore très élevé en provenance des colis (le pic de température se situe quelques dizaines d'années après mise en place des colis).

Dans la **phase 2** (jusqu'à 10 000 ans, environ), le conteneur assure encore la protection des combustibles (en empêchant le retour de l'eau sur ces derniers). La barrière ouvragée argileuse, par sa resaturation, se met en capacité de jouer son rôle de barrière diffusive. La barrière ouvragée continue d'assurer la dissipation vers l'argilite de la chaleur produite par les déchets. Toutefois, l'importance du flux thermique décroît progressivement, à mesure de la décroissance de la puissance thermique des colis.

À plus long terme, dans la **phase 3**, (au-delà de 10 000 ans), le conteneur perd son intégrité et l'eau peut venir au contact des assemblages de combustibles usés. La barrière ouvragée argileuse (resaturée à plus de 95 %) assure alors sa fonction de barrière diffusive limitant les possibilités de transport autour des combustibles usés. Le rôle thermique de la barrière ouvragée s'estompe progressivement.

Le chemisage intérieur des alvéoles de combustibles usés est de même nature que celui des alvéoles C. Son épaisseur est adaptée au diamètre des colis. Des dispositifs facilitant le guidage et la reprise des colis sont envisageables (rails ou cales, garnissages céramiques, par exemple).

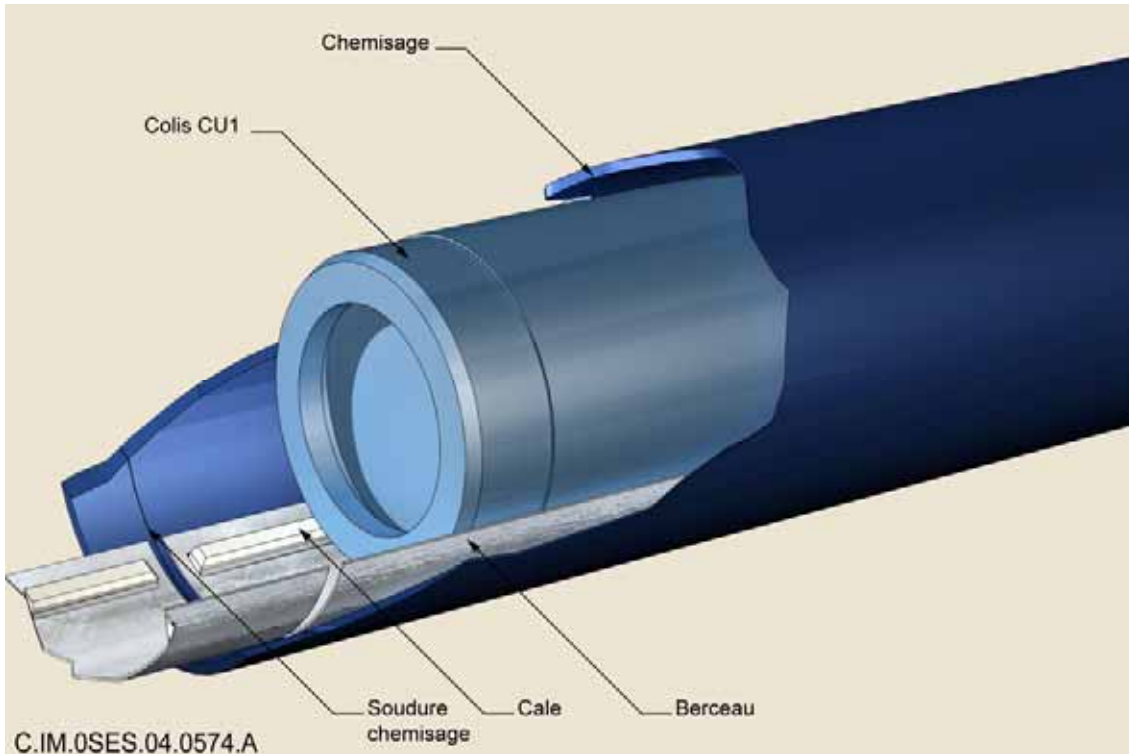


Figure 5.3.12 *Équipement intérieur du chemisage CUI*

● Les composants et les fonctions de la tête d'alvéole en configuration d'exploitation

Le revêtement métallique est identique à celui décrit en partie utile, exception faite des perforations qui sont absentes en tête d'alvéole.

Les anneaux de barrière ouvragée en argile gonflante au niveau de la future zone de scellement sont identiques aux anneaux autour du chemisage définitif.

Les anneaux de béton préfabriqués ont les mêmes dimensions que les anneaux d'argile gonflante. Ces anneaux supportent le chemisage provisoire pendant l'introduction des colis. Ils participent à la radioprotection. Ils assurent le confinement de l'argile pendant sa resaturation et assurent le transfert de la poussée de gonflement de l'argile jusqu'à la galerie d'accès.

● Description de la galerie d'accès

La galerie d'accès est dimensionnée par les nécessités de la manutention des colis de combustibles usés. La longueur de ces derniers conduit à les transporter en long dans la galerie. Il faut en conséquence les faire tourner ou pivoter pour les introduire dans l'alvéole.

Pour la section courante, le gabarit de passage de l'engin de transport des colis est d'environ 4 m par 4 m. Son inscription dans une section proche du circulaire conduit à un diamètre utile d'environ 6 m. Cette valeur est proche de celle de la galerie des modules C ; le soutènement et le revêtement pourront donc être analogues⁹² : soutènement par boulons de 4 m et béton projeté, revêtement de béton B60 coulé en place, d'épaisseur métrique.

⁹² La section excavée devra faire l'objet d'optimisation : à section utile donnée, une forme elliptique minimise les contraintes, donc les épaisseurs de revêtement ; mais une forme plus proche du gabarit carré de l'engin de transport permettrait une section utile plus réduite.

Différentes solutions sont envisageables pour la mise en position du conteneur en vue de son introduction dans l'alvéole. Les diverses figures présentées illustrent la solution par pivotement. L'opération s'effectue dans une « chambre d'accostage », élargissant la galerie d'accès au droit des alvéoles. Les dimensions des colis conduisent à des chambres d'environ 10 m de diamètre. Les études ont vérifié la faisabilité de cette solution : l'entraxe des alvéoles (entre 22,5 m et 24 m comme indiqué au paragraphe 5.3.3.2) est suffisant. La hauteur de chambre est d'environ 7 m ; sa stabilité mécanique est assurée par des boulons de 5 m et des épaisseurs de revêtement de 1,40 m. Une autre solution consisterait à faire tourner progressivement le conteneur en même temps qu'il s'engage dans la tête d'alvéole. Cette solution réduirait la taille des ouvrages de génie civil. Une première étude a permis d'établir la faisabilité de cette deuxième solution.

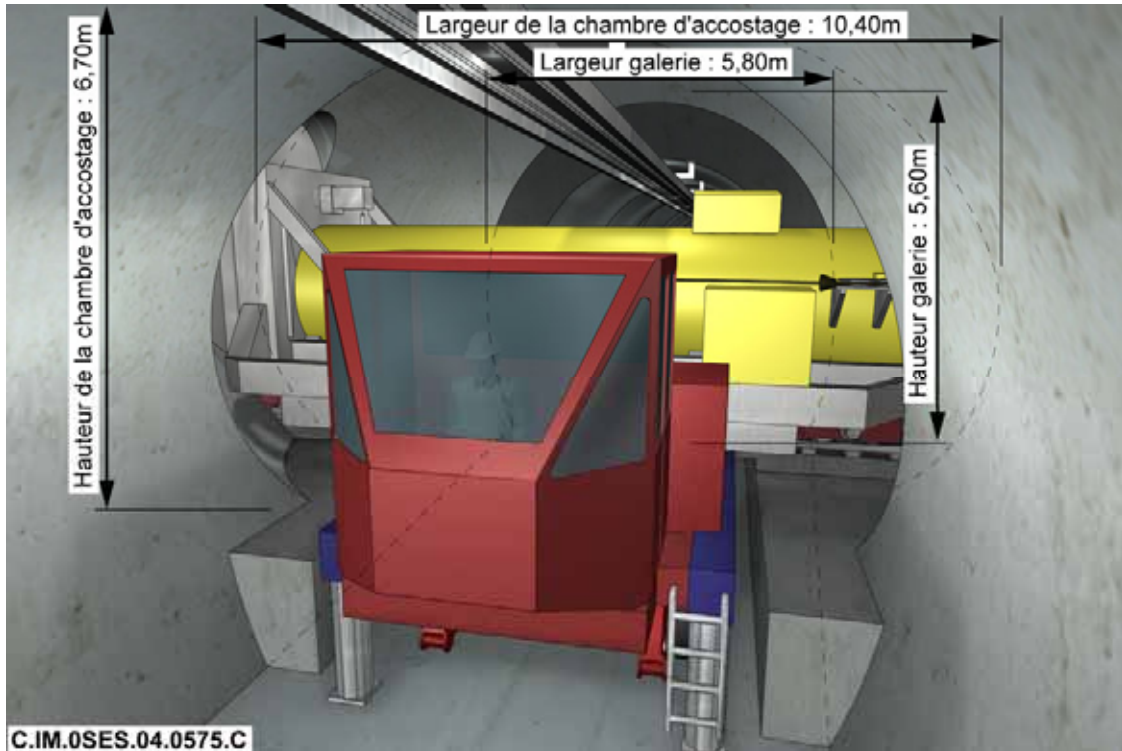


Figure 5.3.13 Galerie d'accès pour combustibles usés de type CU1 ou CU2

Comme pour les galeries d'accès aux alvéoles C, le dimensionnement géotechnique est calculé sur une durée de vie à minima séculaire, et prend en compte les effets thermiques, qui représentent environ 40 % des contraintes sur le revêtement. Le revêtement est dimensionné et construit en cherchant à minimiser son épaisseur ; il n'est pas armé en section courante [65].

5.3.3.2 Dimensionnement des alvéoles

Le dimensionnement des alvéoles porte sur les éléments suivants : choix des matériaux et des caractéristiques de la barrière ouvragée argileuse, stabilité dimensionnelle du chemisage et du revêtement métallique. Le dimensionnement thermique de l'alvéole conduit à définir l'espacement entre colis et l'espacement entre alvéoles.

Les spécificités de l'alvéole de combustibles usés ayant un impact sur le dimensionnement thermique et sur le dimensionnement mécanique sont les suivantes :

- les combustibles usés ont une thermique caractérisée par une décroissance plus lente que celle des déchets C ;
- la présence de la barrière ouvragée modifie le comportement thermique en champ proche (voir plus loin) ;

- la présence de la barrière ouvragée conduit à introduire un revêtement métallique de grand diamètre ;
- enfin, les combustibles usés de type CU1 ont un plus grand diamètre, qui se répercute sur toutes les dimensions radiales des composants de l'alvéole ; il conduit à des épaisseurs plus importantes du chemisage et du revêtement.

● **Description et justification du dimensionnement des anneaux d'argile gonflante**

Les propriétés attendues de la barrière ouvragée argileuse sont une perméabilité aussi faible et une conductivité thermique aussi élevée que possible.

La faible perméabilité vise à créer un milieu diffusif autour des colis ; il s'agit de la première propriété à satisfaire. Les études ont montré qu'une perméabilité de l'ordre de 10^{-13} m/s est accessible à petite échelle, sachant que l'objectif visé à échelle 1 peut se satisfaire d'une perméabilité de 10^{-11} m/s.

La conductivité thermique élevée permet de dissiper la chaleur dégagée par les déchets. Les études ont montré qu'il est possible d'atteindre une conductivité supérieure à $1,5 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$ sur le long terme (matériau resaturé) et supérieure à $1,2 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$ lors du pic thermique (matériau non saturé).

Pour obtenir les deux propriétés précédentes, les caractéristiques suivantes sont envisagées [65], [70] :

- mélange d'argile gonflante (environ 70 %) et de sable (environ 30 %), ce dernier permettant d'améliorer la conductivité thermique ;
- choix d'une argile de type « MX80 » ou équivalent (faible perméabilité, même à faible densité) ;
- pression de gonflement : entre 1 MPa (voire 0,5 MPa) et 7 MPa, en contrainte effective ;
- densité sèche à la mise en place (bloc préfabriqué) : environ 1,8 pour le mélange argile – sable : environ 1,6 pour l'argile seule (elle peut passer à une valeur de 1,5 avec l'évolution de l'alvéole) ;
- degré de saturation de l'argile à la mise en place : de l'ordre de 80 % ;
- teneur en eau : environ 15 % pour le mélange argile – sable; environ 20 % pour l'argile seule ;
- résistance mécanique des blocs : environ 10 MPa en compression, environ 1 MPa en traction.

Une pression de gonflement n'excédant pas 7 MPa est visée : il s'agit de la valeur finale qui s'établira à terme, en équilibre avec l'argilite ; on se reportera au paragraphe 5.2.6.1 pour une discussion sur ce point.

L'ajout de sable à l'argile gonflante permet d'améliorer la conductivité thermique et de diminuer, si besoin, la capacité de gonflement. Une teneur en sable de 30 % permet d'améliorer de façon sensible les caractéristiques thermiques du mélange sans en affecter de façon préjudiciable la perméabilité. La performance thermique du corps de barrière ouvragée revêt ici une grande importance : elle influence la compacité du stockage et l'âge de stockage au plus tôt des colis.

La densité sèche indiquée permet de maintenir ultérieurement la pression de gonflement dans la plage voulue ; elle tient compte des jeux de mise en place.

Les valeurs indiquées de degré de saturation et de teneur en eau à la mise en place réalisent un compromis entre les caractéristiques suivantes : densité sèche à la mise en place, aptitude au compactage et résistance mécanique des pièces.

On notera que les propriétés des matériaux argileux envisagés sont robustes vis-à-vis des perturbations résultant des interactions avec les autres matériaux. Ces interactions sont d'une part la perturbation par le fer, d'autre part la perturbation alcaline.

- La corrosion des aciers (colis, chemisage, revêtement) libère du fer, susceptible d'interagir avec l'argile gonflante et l'argilite : des smectites (gonflantes) sont transformées en chlorites (non gonflantes). Cette transformation se propage radialement dans la barrière ouvragée argileuse, à partir de ses faces internes et externes. Les études évaluent l'extension possible depuis une surface de contact avec l'acier à 30 à 50 cm ; elle peut concerner la totalité de la barrière ouvragée. Mais, sauf dans la zone au contact, elle est limitée en intensité (au-delà de 5 cm de l'interface, la part de

smectites transformées est inférieure à 10 % et à 1 %, au-delà de 30 cm). La barrière ouvragée conserve donc l'essentiel de sa capacité de gonflement.

- La perturbation alcaline transforme des smectites (gonflantes) en illites (non gonflantes). Elle est liée à la présence de béton (massif d'appui et du revêtement de la galerie d'accès). Elle se développe axialement, depuis la face d'appui du bouchon d'argile. Les études évaluent son extension à 0,60 m, à 100 000 ans, et moins de 2 m, à un million d'années⁹³. La perturbation peut affecter une partie du bouchon, mais elle n'atteint pas la barrière ouvragée argileuse de la partie utile de l'alvéole [71], [58].

- **Spécificités du dimensionnement thermique des alvéoles et des modules de combustibles usés**

Le critère de dimensionnement thermique à court terme et le mode de calcul restent identiques à ceux retenus pour les déchets C (voir section 5.2.3.3). À l'instar des alvéoles C, le dimensionnement thermique des alvéoles de combustibles usés dépend de (i) l'âge (ou la puissance thermique) des colis à la date de la mise en stockage, (ii) la distance entre alvéoles adjacentes (entraxe ou pas Px), (iii) la distance entre fonds d'alvéoles (pas Dy), (iv) le nombre de colis par alvéole (N).

En revanche, les combustibles usés diffèrent des déchets C par leur puissance thermique initiale élevée, qui évolue de 7 000 watts à 1 000 watts en 100 ans, et par leur faible décroissance thermique (cf. Figure 3.2.20 chapitre3). En outre, le concept avec barrière ouvragée introduit les données supplémentaires thermiques suivantes :

- une barrière ouvragée de 800 mm d'épaisseur dont la conductivité thermique est inférieure à celle du milieu géologique ;
- deux jeux fonctionnels supplémentaires autour de la barrière ouvragée ;
- un accroissement du pas minimum entre alvéoles qui, pour des raisons géotechniques, est d'environ 13 mètres pour les alvéoles CU2 et 16,5 mètres pour les alvéoles CU1.

Il en résulte que l'emprise horizontale et le volume excavé des modules de combustibles usés sont plus élevés que ceux des modules de déchets C.

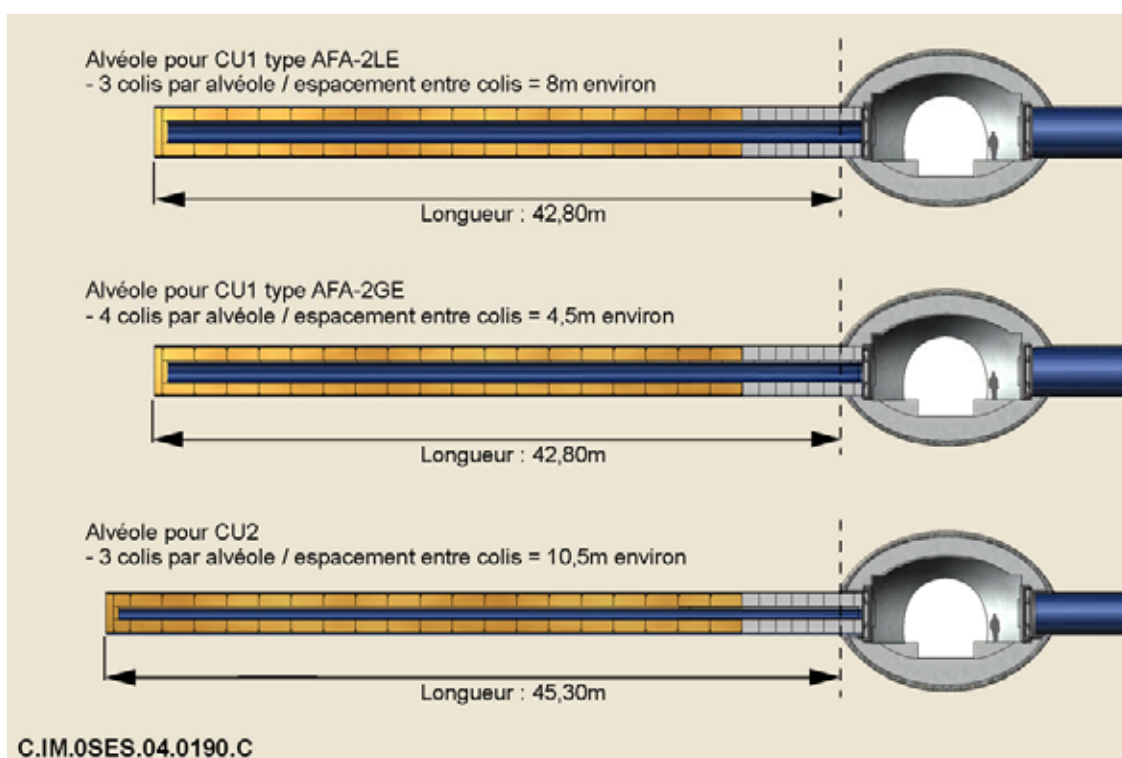
Résultats du dimensionnement thermique pour les divers colis de combustible usé

Les architectures des modules de stockage présentées ici ont été définies pour une durée d'entreposage correspondant à un stockage au plus tôt des colis pour les concepts proposés, soit 60 ans pour les colis CU1 et 90 ans pour les colis CU2. Pour ces durées d'entreposage, les emprises horizontales par type de colis stockés dans un module sont récapitulées dans le Tableau 5.3.2. Les alvéoles correspondantes sont représentées sur la Figure 5.3.14.

⁹³ Cette extension varie de quelques décimètres, selon la puissance thermique dégagée par les colis

Tableau 5.3.2 *Emprise pour stocker les combustibles usés*

Modules pour colis de stockage	CU 1 long ⁹⁴	CU 1 court ⁹⁵	CU2
Age (ans) : durée d'entreposage.	60	60	90
Emprise horizontale (m ² /colis stocké)	385	301	346
N : nombre de colis par alvéole.	3	4	3
Px (m) : entraxe entre alvéoles.	22,5	22,5	24
Dy (m) : Dist. Entre fonds d'alvéoles.	20	20	20
Lua (m) : Longueur utile de l'alvéole.	32	32	34.5
Pc (m) : Pas entre colis ⁹⁶ .	7,5	4,2	10.3

Figure 5.3.14 *Coupe longitudinale des alvéoles CU1 et CU2*

L'évolution de la température en paroi de barrière ouvragée argileuse entre 0 et 600 ans (voir Figure 5.3.15) montre que, pour les dimensionnements du tableau ci-dessus, le retour sous le seuil de 70 °C se produit bien avant 1 000 ans, ce qui satisfait le critère thermique à long terme.

⁹⁴ CU1 long = colis type AFA-2L2, en provenance des réacteurs 1300/1450 MWe ; longueur = 5 390 mm

⁹⁵ CU1 court = colis type AFA-2G2, en provenance des réacteurs 900 MWe ; longueur = 4 640 mm

⁹⁶ Le pas réel entre colis sera ajusté en fonction de la longueur effective des intercalaires (contraintes liées aux équipements de manutention, hotte notamment)

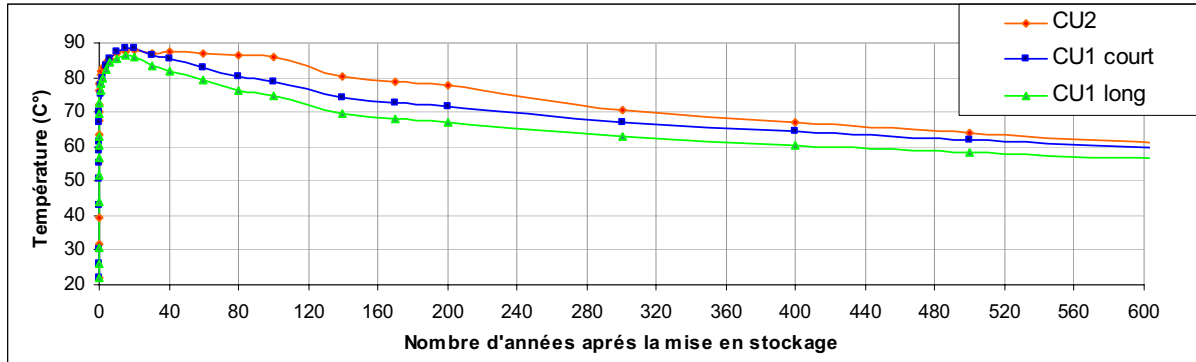


Figure 5.3.15 Température en paroi de barrière ouvragée argileuse pour les combustibles usés

Le dimensionnement présenté conduit à une décroissance de la température dans l'argilite, plus rapide que dans le cas des déchets C. Ce résultat peut sembler paradoxal, eu égard à la décroissance plus lente de la puissance thermique des combustibles usés ; il est dû aux distances importantes entre colis imposées par le critère thermique à court terme.

- **Spécificités des dimensionnements mécaniques et thermomécaniques des alvéoles de combustibles usés**

Le chemisage des alvéoles doit maintenir des jeux fonctionnels préservant la possibilité de retirer les colis, sur une durée d'ordre séculaire (quelques siècles). Le calcul de dimensionnement est identique au cas des alvéoles de déchets C, dans sa finalité et ses hypothèses. Seul diffère le diamètre plus grand des alvéoles.

Il en résulte une épaisseur du chemisage (tenant compte du dimensionnement mécanique et d'une réserve de corrosion de quelques millimètres) de 40 mm pour les CU1 et 25 mm pour les CU2. Ces dimensionnements sont fondés sur le même cas de charge que pour les alvéoles C (12 MPa).

Le creusement des alvéoles avec barrière ouvragée argileuse, puis la mise en place des anneaux de barrière ouvragée, impliquent le recours à un soutènement métallique de sécurisation. Comme indiqué plus haut, les calculs de prédimensionnement conduisent à une virole d'épaisseur 30 mm environ pour les colis CU1 et 25 mm environ pour les colis CU2 [65].

5.3.3.3 Construction de l'alvéole

Cette section décrit les méthodes et moyens de creusement et revêtement de l'alvéole, puis la préparation et la mise en place des composants de barrière ouvragée, et enfin la mise en place des autres équipements de l'alvéole.

- **Creusement et revêtement de l'alvéole**

L'alvéole peut être creusée par diverses méthodes. La technique du micro-tunnelier paraît particulièrement adaptée, les tubes de poussée restant en place et constituant le revêtement métallique. L'outil de coupe est du type roue pleine face, technique qui, de par l'homogénéité du front d'attaque, minimise les dommages induits dans le terrain⁹⁷. En fin de creusement, la tête du micro-tunnelier est extraite de l'alvéole.

Cette méthode de creusement – revêtement permet de travailler à tout instant à l'abri du revêtement métallique.

⁹⁷ La roue pleine face pourrait être remplacée par une machine à attaque ponctuelle si des essais in situ montraient qu'elle permet d'obtenir une qualité de découpe identique à celle obtenue avec la roue pleine face.

Outil de coupe et bouclier

L'outil de coupe est une roue pleine face à molettes rétractables. Cette disposition permet le retrait de la tête du micro-tunnelier à l'intérieur du revêtement métallique laissé en place (Figure 5.3.16).

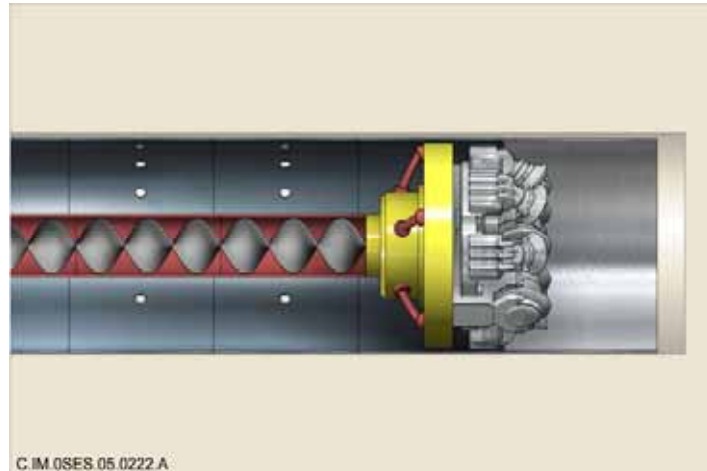


Figure 5.3.16 Roue de coupe (molettes pivotées) en cours de retrait dans le revêtement

L'outil de coupe peut travailler à l'avant d'un bouclier, c'est-à-dire d'une virole métallique protégeant la motorisation de la rotation du micro-tunnelier. Le bouclier est alors perdu en fin de creusement : après démontage de ses éléments intérieurs, il est abandonné dans le terrain et constitue la partie terminale du revêtement métallique.

La poussée sur la roue de coupe peut être exercée par les vérins montés sur un bâti de poussée ; elle est transmise par des tubes de poussée qui, laissés en place, constituent le revêtement de l'alvéole.

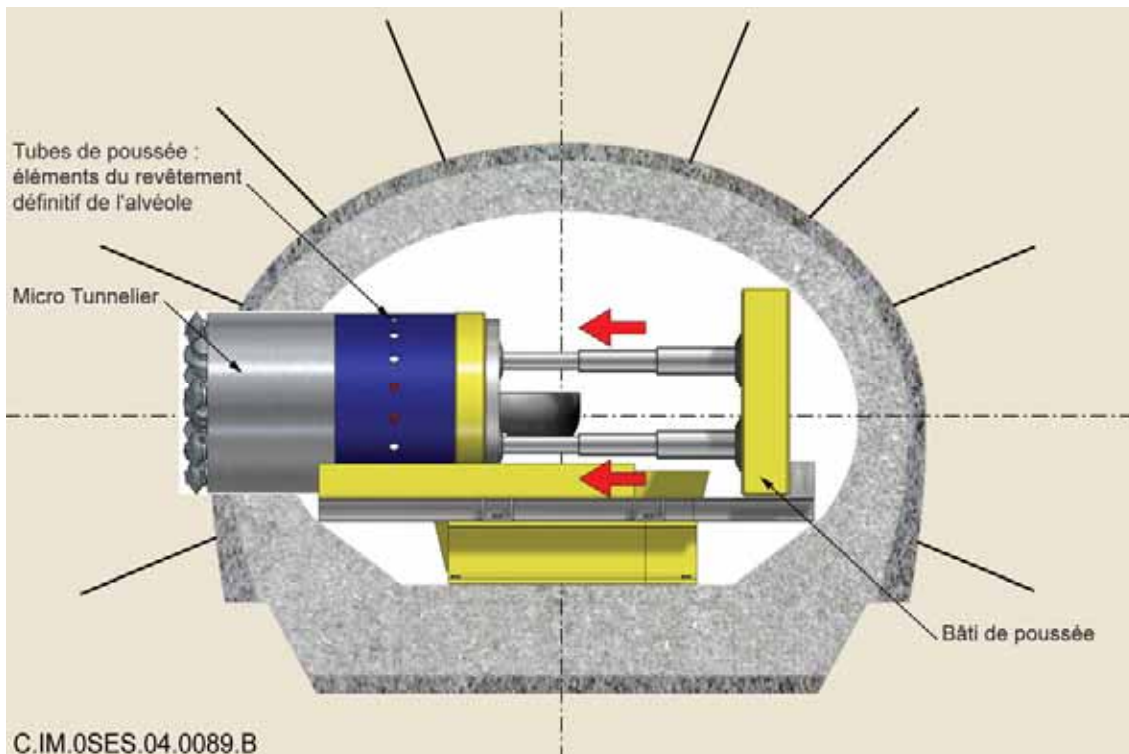


Figure 5.3.17 Bâti de poussée dans la galerie d'accès (cas pénalisant d'une galerie d'accès sans chambre d'accostage)

Mise en place des tubes de poussée (futur revêtement)

Les tubes de poussée sont mis en place par éléments de 2 m de longueur environ, voire plus si les dimensions de la galerie d'accès le permettent. Ils sont soudés entre eux après ajustement par un système de vérins solidaires du parement de la galerie.

● **Mise en place de la barrière ouvragée et du chemisage**

La barrière ouvragée argileuse décrite ci-avant pourrait être constituée d'anneaux complets d'une seule pièce. Le diamètre extérieur des anneaux est d'environ 2 mètres et leur épaisseur (selon l'axe de l'alvéole) de 0,5 m. Ces dimensions résultent de contraintes de fabrication. Chaque anneau ainsi préfabriqué aurait une masse d'environ 5 tonnes.

Il existe deux techniques de compaction de pièces de cette dimension : le pressage uniaxial et le pressage isostatique. Le premier est pratiqué par exemple en Suède [72], [73] ; le second a été expérimenté au Japon, sur des cylindres de 1,3 m de diamètre et 1,7 m de hauteur [74]. Le procédé isostatique présente comme avantages la rapidité d'exécution et l'homogénéité du matériau ; il permet de compacter des blocs de grandes dimensions. Toutefois, le pressage uniaxial dispose aujourd'hui de références plus nombreuses.

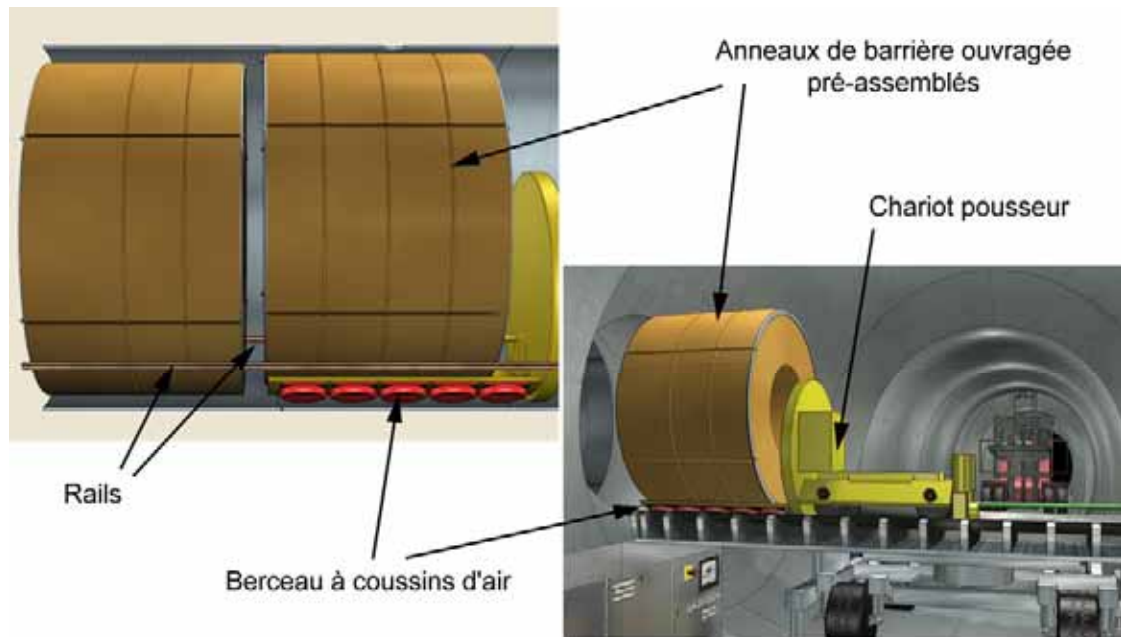
Une presse uniaxiale de grande capacité (par exemple : 30 000 tonnes) permet d'atteindre les pressions supérieures à 50 MPa nécessaires pour obtenir des densités sèches voisines de 1,9.

Introduction des anneaux de barrière ouvragée préassemblés

Afin de simplifier les opérations de mise en place, les anneaux peuvent être assemblés quatre par quatre, en atelier. Un tel mode d'assemblage est en cours d'étude dans le cadre du projet européen ESDRED.

Diverses techniques de mise en place de ces anneaux dans l'alvéole sont envisageables. Pour des raisons d'encombrement et de disponibilité de retour d'expérience, la technique des coussins d'air paraît particulièrement adaptée. Les anneaux préassemblés sont posés sur un berceau muni de coussins d'air (voir Figure 5.2.17). Après gonflage des coussins d'air, un chariot roulant sur les rails de guidage pousse le berceau jusqu'à la position requise dans l'alvéole. Les coussins d'air sont alors dégonflés. Les anneaux prennent alors appui sur les rails, libérant ainsi le berceau.

La capacité portante d'un coussin d'air de 380 mm de diamètre est de l'ordre de 2 500 kg. Chaque coussin est gonflé à 0,3 MPa et soulève légèrement l'anneau à déplacer par sustentation.



C.IM.0SES.04.0500.A

Figure 5.3.18 Mise en place des anneaux de barrière ouvragée par coussin d'air

Introduction des anneaux de béton en tête d'alvéole et liaison avec le revêtement de la galerie d'accès.

Les anneaux de béton constituant le futur appui du bouchon d'argile gonflante sont introduits à la suite des anneaux de barrière ouvragée en argile gonflante. Ils participent à la protection de l'argile gonflante contre les variations hygrométriques durant les phases de construction et d'exploitation.

Une butée mécanique est ensuite réalisée avec le revêtement de la galerie afin de reprendre les éventuelles poussées de gonflement de l'argile.

Introduction du chemisage

Le chemisage est introduit après le dernier anneau de béton. L'assemblage des éléments de tube par soudage est privilégié, comme pour l'alvéole C, et pour les mêmes raisons.

Concernant l'équipement de l'alvéole, des dispositions spécifiques sont envisagées pour faciliter la manutention des colis, compte tenu de leurs dimensions : un berceau équipé de cales, éventuellement garnies de céramiques est une solution possible (voir Figure 5.3.12). Les cales peuvent être fixées aux tronçons de berceau en atelier de façon à faciliter leur mise en place dans le chemisage.

5.3.3.4 Fermeture de l'alvéole

La fermeture de l'alvéole de combustibles usés débute comme celle de l'alvéole C, par la mise en place du bouchon métallique de protection biologique.

Vient ensuite lorsque le choix en est fait, la mise en place du noyau d'argile gonflante, en complément des anneaux déjà installés. Au moins deux procédés sont envisageables :

- l'un consiste à introduire dans l'espace central des cylindres préfabriqués, vraisemblablement simultanément au retrait du chemisage provisoire ; ce procédé conduit toutefois à la création d'un espace annulaire initial entre les cylindres préfabriqués et les anneaux déjà en place (épaisseur du chemisage provisoire augmentée de jeux de manutention), espace qui se refermera à terme par gonflement de l'argile ;
- un autre procédé envisageable serait le compactage en place de pellets ou de poudre d'argile ; il s'effectuerait de façon analogue à la solution décrite pour l'alvéole C.

À ce stade la solution par éléments préfabriqués apparaît la plus simple.

La phase suivante consiste à achever le massif d'appui. À la différence de l'alvéole C, une partie du massif d'appui est déjà en place avant la fermeture de l'alvéole (anneaux de béton préfabriqués). La fermeture consiste donc ici à couler un bouchon de béton complémentaire dans l'espace central et à injecter, si besoin, les contacts béton/béton et béton/revêtement.

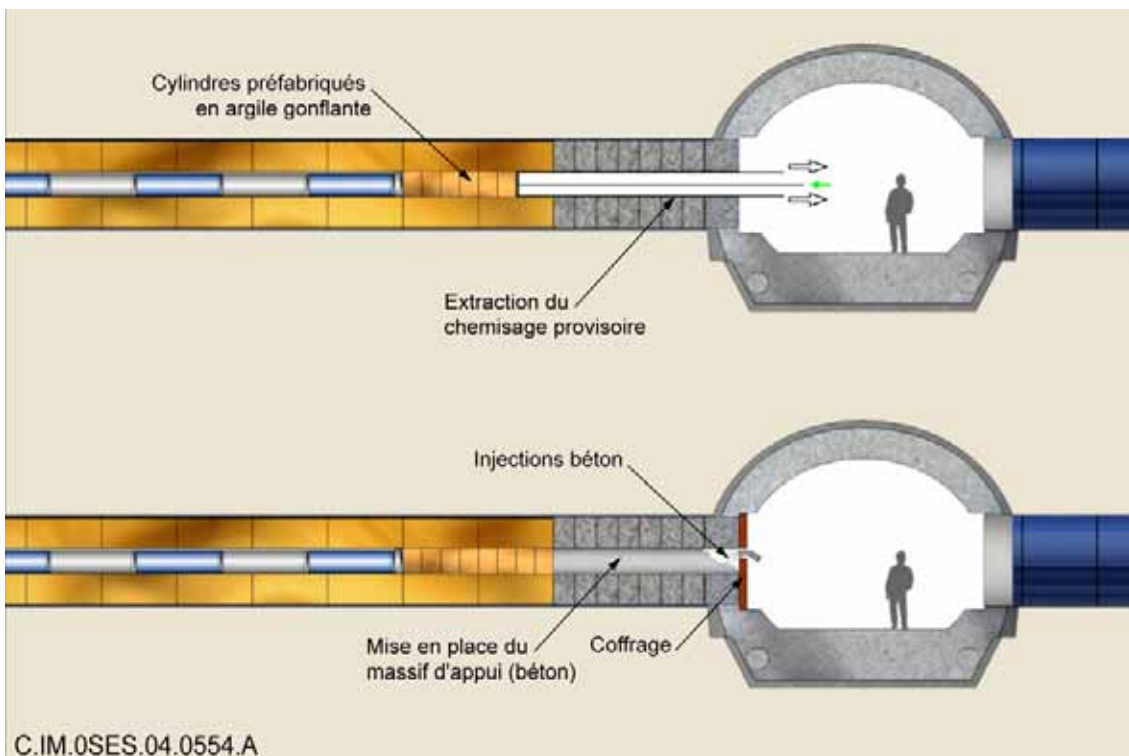


Figure 5.3.19 Principe du démontage du chemisage et de la mise en place simultanée du bouchon d'argile gonflante (alvéoles CU)

5.3.4 Agencement des alvéoles CU1 et CU2 dans les modules de stockage

L'agencement des modules de stockage CU1 et CU2, tel que proposé aujourd'hui, est tout à fait comparable à celui des modules C. Chaque module est composé de deux unités de travail, chaque unité de travail regroupant trois galeries d'accès. Seuls diffèrent le nombre d'alvéoles et le détail des galeries d'infrastructures secondaires.

Les modules CU1 et CU2 contiennent de 80 à 130 alvéoles.

La prise en compte des hypothèses de flux conduit à proposer des galeries d'infrastructure secondaire au nombre de cinq dans les zones de stockage CU1 et quatre dans les zones de stockage CU2. La galerie supplémentaire des zones CU1 est une galerie de retour d'air justifiée par les besoins d'exploitation⁹⁸.

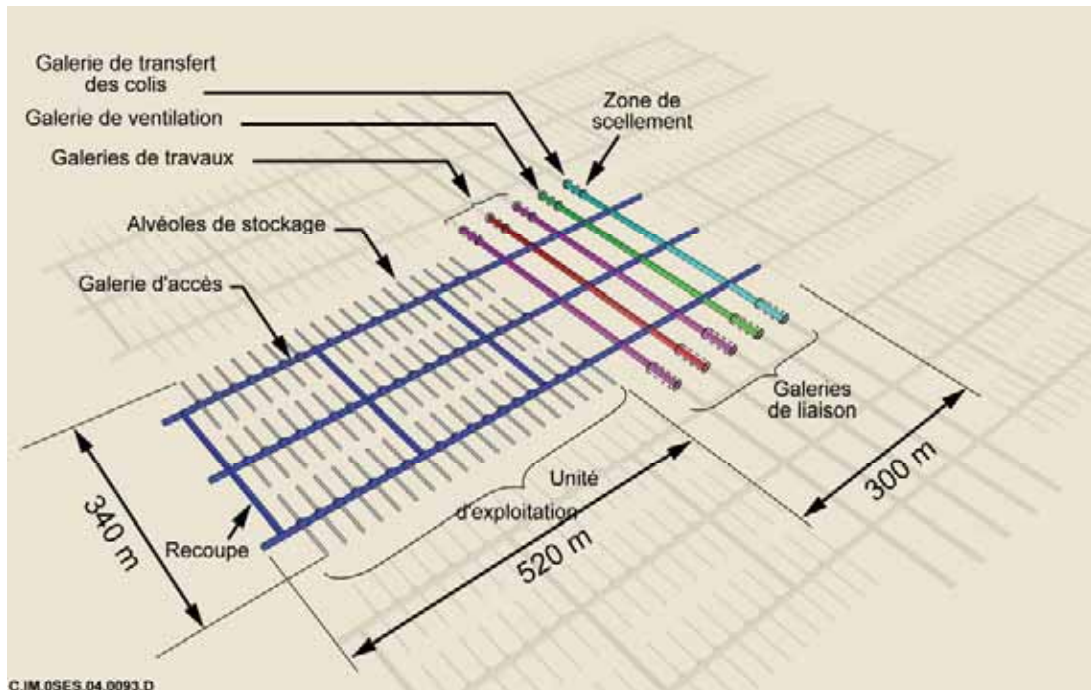


Figure 5.3.20 Agencement général d'une unité d'exploitation d'un module de colis CU1

Contrairement au cas des colis C, pour lequel des différences de dimensionnement thermique sont constatées d'un type de colis à l'autre, les dimensionnements thermiques des colis CU1 et CU2 sont relativement homogènes.

5.3.5 Le module CU3

Les caractéristiques thermiques et dimensionnelles des colis CU3 et des colis C0 sont voisines. Ceci permet, à ce stade des études, de fonder la conception d'un module CU3 sur celle d'un modules C0.

En solution de référence, l'alvéole est dépourvue de barrière ouvragée. En raison de leur faible charge thermique, les colis y sont stockés sans intercalaire. L'entraxe entre les alvéoles est de 8,5 m (identique à l'entraxe des alvéoles C0).

La galerie d'accès des colis CU3 est similaire à celle des colis C0, à l'exception de sa largeur qui devra être augmentée d'environ 40 cm pour permettre le passage de la hotte CU3.

⁹⁸ Une augmentation de diamètre utile de 1 m permettrait de ramener le nombre de galeries d'infrastructure secondaire de cinq à quatre pour les zones CU1

6

Architecture souterraine d'ensemble

6.1	Exposé des questions principales.....	256
6.2	Conception d'ensemble.....	262
6.3	Facteurs de dimensionnement de l'architecture	268
6.4	Logique de construction et d'exploitation d'ensemble du stockage	274
6.5	Dimensionnement des infrastructures de liaison	284
6.6	Adaptation de l'architecture souterraine à différents scénarios	286

L'objectif de ce chapitre est d'exposer la logique d'agencement des modules de stockage dans la formation argileuse étudiée, ainsi que celle des puits et galeries permettant d'y accéder.

En introduction, il rappelle les principales questions devant être prises en compte par une architecture d'ensemble, relativement à la sûreté à long terme, à la réversibilité et aux aspects opérationnels.

Il expose ensuite les principes de conception retenus pour y répondre. Ces principes comprennent notamment une organisation arborescente et modulaire des zones de stockage, tant pour des raisons de sûreté à long terme que pour offrir une souplesse de gestion. On montre aussi comment l'architecture permet d'adapter l'orientation des ouvrages à la distribution des contraintes mécaniques naturelles dans la formation.

Ce chapitre précise ensuite les principaux facteurs dimensionnants de l'architecture d'ensemble. La stabilité géomécanique définit des distances à respecter entre excavations. Les critères thermiques conditionnent l'emprise surfacique des zones de stockage des déchets qui produisent de la chaleur ; en particulier, l'indépendance thermique des zones de stockage est vérifiée. Enfin, ce chapitre précise pourquoi un regroupement des ouvrages de liaison jour - fond et un principe d'éléments en cul de sac permettent, à ce stade, de renforcer la robustesse de la maîtrise des circulations d'eau sur le long terme.

Le mode de réalisation progressive des modules de stockage, dans le cadre d'une approche phasée, est décrit. Les flux de matériaux, de colis et de ventilation déterminent le nombre et les dimensions des galeries de liaison permettant de construire puis d'exploiter les modules de stockage.

Enfin, ce chapitre esquisse quelques ordres de grandeur quant à l'emprise souterraine d'un stockage correspondant aux scénarii de production de colis introduits au chapitre 3. Il présente aussi la sensibilité de l'emprise à la durée d'entreposage préalable des déchets de haute activité.

6.1 Exposé des questions principales

6.1.1 Sûreté à long terme

Le chapitre 2 a introduit les fonctions de sûreté à long terme d'un stockage. L'architecture présentée ici retient des dispositions favorisant ces fonctions. Un premier volet concerne la limitation des possibilités de circulation d'eau dans le stockage ; en effet, l'architecture conditionne le schéma de comportement hydraulique d'ensemble. L'implantation des ouvrages dans la formation argileuse intervient également sur la capacité du stockage à retarder et atténuer la migration des radionucléides relâchés par les colis. Enfin, l'architecture d'ensemble doit contribuer à limiter les perturbations mécanique, thermique et chimique du milieu d'accueil et des modules de stockage.

6.1.1.1 Maîtrise du comportement hydraulique du stockage

La recherche d'une limitation de la circulation d'eau concerne plusieurs échelles spatiales dans le stockage : voisinage immédiat des colis, alvéoles, ensemble du stockage.

À l'échelle de l'alvéole, une limitation du renouvellement d'eau permet de réduire l'altération des colis et le relâchement des radionucléides qu'ils contiennent ; le chapitre 5 a indiqué qu'une très faible vitesse de circulation, rendant le transport par convection négligeable, favorise en particulier la durabilité du verre constitutif des déchets C et celle des pastilles de céramique du combustible usé. À l'échelle du stockage, une limitation des écoulements dans les galeries et puits s'oppose à la migration des radionucléides qui auraient été relâchés.

Les caractéristiques de la formation étudiée (faible perméabilité, faibles gradients) limitent naturellement les flux d'eau susceptibles d'être drainés dans l'argilite. Cependant, on s'est interrogé sur la possibilité, au travers de l'architecture du stockage, de réduire encore ces flux dans chaque type d'ouvrage, notamment en y minimisant les différences de charge hydraulique. Vis-à-vis de cette fonction, l'architecture et les scellements de galeries et de puits peuvent jouer des rôles complémentaires, renforçant la robustesse du concept.

6.1.1.2 Une implantation des ouvrages favorisant le retard et l'atténuation de la migration de radionucléides

Pour retarder et atténuer la migration de radionucléides qui auraient été relâchés par les colis, la formation argileuse constitue la barrière de rétention essentielle. Le transport d'espèces en solution s'y effectue principalement par la diffusion dans l'eau présente dans les pores de l'argilite : physiquement, l'agitation moléculaire déplace les solutés très lentement, des zones où la concentration dans l'eau est la plus élevée - les alvéoles - vers les zones à faible concentration. Pour la plupart des espèces, ce déplacement est retardé par des phénomènes chimiques de sorption à la surface des minéraux.

Aussi, un objectif pour l'implantation des ouvrages dans la formation argileuse est de maximiser la durée de parcours et les temps de diffusion. Cela permet (i) en favorisant la dispersion, de limiter le flux des solutés atteignant les limites de la formation argileuse, et d'y réduire par conséquent les concentrations et (ii) de bénéficier de la décroissance radioactive des radionucléides.

À ce stade de la conception d'une architecture, on a considéré la seule formation argileuse du Callovo-Oxfordien comme barrière de rétention, sans prendre en compte les contributions additionnelles des formations encaissantes.

6.1.1.3 Limitation des perturbations mécaniques du milieu

Les perturbations mécaniques induites dans l'argilite voisine par la réalisation des ouvrages doivent être limitées. Cela évitera que d'éventuels dommages dans l'argilite n'augmentent les flux d'eau dans le stockage ou ne diminuent significativement les temps de migration des radionucléides relâchés par les colis.

Le premier point concerne en particulier les scellements, pour lesquels il convient de se prémunir d'un risque de court-circuit hydraulique par la zone d'argilite endommagée. Pour cela, on cherche, à ce stade, à implanter les ouvrages susceptibles d'être scellés de manière la plus favorable au regard de la réponse mécanique de l'argilite. Pour mémoire, le chapitre 5 a indiqué comment de telles dispositions peuvent être intégrées dans la conception de chaque module de stockage.

Plus généralement, autour des ouvrages de stockage, l'épaisseur d'argilite potentiellement endommagée par la construction doit rester faible par rapport à l'épaisseur totale de la formation étudiée. Ce point a aussi déjà été évoqué au chapitre 5.

6.1.1.4 Limitation des perturbations thermiques

Les déchets C vitrifiés et, le cas échéant, les combustibles usés, se caractérisent par un dégagement thermique notable. Le chapitre 5 a explicité les critères de température retenus pour l'étude d'un stockage, afin de rester dans un domaine aujourd'hui maîtrisé, en matière (i) d'évolution des matériaux (ii) de connaissance et de modélisation des phénomènes : pour mémoire, on cherche à maintenir la température du stockage à moins de 100°C ; concrètement on a retenu un critère de 90 °C en paroi d'argilite (ou le cas échéant de barrière ouvragée argileuse). Le chapitre 5 a aussi décrit les éléments de dimensionnement des modules de stockage permettant de respecter ces critères.

Les maxima de température dans les modules de stockage de déchets exothermiques sont atteints rapidement après l'introduction des colis, alors que les flux de chaleur sont encore confinés à l'intérieur d'un même module. Aussi ces maxima ne dépendent en pratique que de la conception de chaque module. Sur des temps plus longs, la température des alvéoles diminue, avec la décroissance radioactive des déchets.

Cependant, le volume influencé thermiquement par chaque ouvrage s'étend progressivement au cours du temps, avec la diffusion de la chaleur dans le milieu. Aussi l'agencement relatif des différents modules dans une architecture d'ensemble intervient sur le comportement thermique à long terme du stockage, et sur la distribution des températures sur une grande échelle spatiale.

On notera également le lien entre la durée de la phase thermique d'un stockage et la conception de colis de stockage, explicité au chapitre 4.

On rappelle aussi dans ce cadre que les modules de stockage de colis types B2 (boues bitumées) doivent autant que possible être maintenus à une température inférieure à 30 °C, afin de préserver l'intégrité du bitume et de sa capacité de confinement. L'architecture doit donc les protéger d'un flux thermique provenant à terme d'autres colis dégageant de la chaleur.

6.1.1.5 Limitation des perturbations physico-chimiques, indépendance des différentes catégories de colis

On considère le stockage des différentes catégories de colis dans des zones de stockage physiquement distinctes. Cette séparation évite la prise en compte d'interactions entre ces différentes catégories, dans l'étude de l'évolution à long terme du stockage.

Au-delà des interactions thermiques mentionnées ci-dessus, cela concerne aussi les interactions physico-chimiques potentielles.

Au sein de la catégorie des déchets B, ce même souci a conduit, au chapitre 5, à considérer des modules de stockage spécifiques selon le contenu chimique des déchets ; il convient alors, dans une architecture d'ensemble, de séparer ces différents modules.

6.1.1.6 Fractionnement

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, le stockage peut être subdivisé en sous-ensembles séparés entre eux par des scellements.

6.1.2 Prise en compte de la réversibilité

La réversibilité est associée à la souplesse de gestion des colis stockés. Elle renvoie à la capacité à récupérer les colis et à la capacité d'action sur le processus de stockage. Comme indiqué au chapitre 5, la capacité à récupérer les colis influence au premier chef la conception des alvéoles de stockage.

6.1.2.1 Capacité d'action

La capacité d'action sur le processus de stockage se traduit en particulier par la possibilité de prendre des décisions sur une partie du stockage sans obérer les décisions prises ou à prendre sur d'autres parties du stockage. En d'autres termes, pour pouvoir s'exercer effectivement, la capacité d'action implique une conception modulaire du stockage. Celui-ci est ainsi divisé en sous-ensembles pouvant être gérés individuellement, avec une souplesse d'exploitation comparable à celle d'un entreposage.

La modularité ainsi définie rejoint l'intérêt d'un fractionnement pour la sûreté à long terme.

6.1.2.2 Réalisation progressive du stockage

La durée de mise en stockage des colis, qui pourra s'étendre sur plusieurs décennies, incite à prévoir une construction progressive du stockage. Avec l'accumulation du retour d'expérience de l'exploitation du stockage, de l'amélioration de la connaissance scientifique et de l'évolution de la technologie, il est possible d'envisager que les méthodes de stockage évoluent dans le temps.

Une conception modulaire du stockage, combinée avec une construction progressive, permet de prendre en compte ces évolutions : en ne construisant les différents sous-ensembles constitutifs du stockage qu'au fur et à mesure des besoins, on se donne la possibilité de modifier la conception de ces sous-ensembles.

6.1.3 Prise en compte de la sûreté opérationnelle et de la diversité des activités

La conception de l'architecture du stockage doit intégrer la possibilité de construire des sous-ensembles du stockage dans le même temps 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 génie civil (construction et fermeture des ouvrages). Ces activités se caractérisent

par des exigences de sécurité/sûreté et de gestion de flux physiques différentes. La sécurité et l'efficacité incitent à concevoir les installations de façon à séparer ces activités dans l'espace ou le temps.

6.1.3.1 Les activités de construction

Les activités de construction concernent le creusement, le soutènement, le revêtement et l'équipement des ouvrages souterrains. Elles relèvent d'un chantier classique de travaux souterrains ou d'exploitation minière souterraine.

6.1.3.2 Les activités de mise en stockage ou « d'exploitation nucléaire »

Les activités de mise en stockage ou d'« exploitation nucléaire » concernent la réception de colis primaires et la préparation de colis de stockage dans les installations de surface, le transfert de ces colis de stockage dans les installations souterraines et leur mise en place dans les alvéoles de stockage.

Elles concernent aussi l'observation des installations durant la période où ces dernières sont accessibles, dans le cadre d'une gestion réversible du stockage.

Ces activités nucléaires sont caractérisées par des sujétions similaires à celles des installations nucléaires classiques.

6.1.3.3 Les activités de fermeture

Ces activités concernent d'une part le scellement des alvéoles, le scellement et le remblayage des galeries ainsi que le scellement et le remblayage des puits.

Le scellement des alvéoles nécessite des techniques de génie civil à proximité immédiate d'un ouvrage à caractère « nucléaire » ; il sera donc soumis à des sujétions semblables à celles de l'exploitation nucléaire.

Le scellement et le remblayage des galeries sont possibles avec des techniques de génie civil hors contexte « nucléaire » car ils sont situés à une distance significative des alvéoles de stockage.

6.1.3.4 Ventilation des installations souterraines

La ventilation est un élément essentiel d'hygiène et de sécurité de tout ouvrage souterrain. À ce titre, elle est un élément dimensionnant qui doit être pris en compte dès la conception de l'ouvrage. Elle permet au personnel de travailler dans un air frais sans cesse renouvelé ; elle donne la possibilité d'évacuer le personnel et de maîtriser les fumées en cas d'incendie.

6.1.4 Les quantités et flux de colis et de matières à transférer dans les installations souterraines

D'un point de vue quantitatif (nombre d'alvéoles, volumes excavés, emprise du stockage), l'architecture du stockage est déterminée de façon directe par le nombre des colis à stocker.

L'architecture est également déterminée par le déroulement du processus de stockage, qui intervient à deux niveaux. D'une part, la durée d'entreposage préalable des colis fortement exothermiques influence le nombre de colis stockés par alvéole et l'espacement entre les alvéoles. D'autre part, le rythme de mise en place du stockage conditionne, dans une approche de construction progressive du stockage, celui des travaux de construction et donc le dimensionnement des infrastructures nécessaires à la conduite de ces travaux.

Les données quantitatives sur lesquelles reposent les architectures données dans ce chapitre, font référence aux différents scénarios d'étude et aux hypothèses de flux de réception de colis exposés au chapitre 3. Les volumes de colis de stockage sont ceux des colis décrits au chapitre 4. Le nombre et la disposition des alvéoles correspondent aux descriptions du chapitre 5.

D'un point de vue thermique, les quantitatifs donnés dans la présente section correspondent au « stockage raisonnablement au plus tôt » des déchets fortement exothermiques, avec les options présentées au chapitre 5. L'influence d'un allongement éventuel de la durée d'entreposage préalable et d'une modification du rythme de stockage sera discutée à la section 6.6.

6.1.4.1 Récapitulatif des quantités de colis considérées et nombre d'alvéoles

Le Tableau 6.1.1 rappelle les nombres de colis primaires de déchets et de combustibles usés à prendre en compte s'il était décidé de les considérer aussi comme des déchets. En regard, sont indiqués les nombres correspondants de colis de stockage, et d'alvéoles de stockage.

D'un point de vue thermique, on peut considérer trois niveaux :

- les colis non ou peu exothermiques (colis B) ;
- les colis moyennement exothermiques (colis C0), qui peuvent être stockés sans entreposage préalable ;
- les colis fortement exothermiques (colis C1 à C4, et le cas échéant CU1 et CU2), qui nécessitent un entreposage préalable de plusieurs dizaines d'années, dont la durée impacte le dimensionnement des zones de stockage.

Tableau 6.1.1 Quantités de colis considérées et nombre d'alvéoles

		Scénario S1a	Scénario S1b	Scénario S1c	Scénario S2
Colis non ou peu exothermiques					
Déchets B	Nombre de colis primaires	199 815	197 115	197 115	168 265
	Nombre de colis de stockage	54 700	54 000	54 000	46 200
	Volume des colis de stockage m ³	321 000	317 000	317 000	273 000
	Nombre d'alvéoles	38	37	37	32
Colis moyennement exothermiques					
Déchets C0	Nombre de colis primaires	4 120			
	Nombre de colis de stockage	4 120			
	Volume des colis de stockage m ³	1 600			
	Nombre d'alvéoles	200			
Colis fortement exothermiques					
Déchets C1 C2 C3 C4	Nombre de colis primaires	32 200	32 100	38 350	10 560
	Nombre de colis de stockage	32 200	32 100	38 350	10 560
	Volume des colis de stockage m ³	12 900	12 800	15 300	4 200
	Nombre d'alvéoles	4 800	4 500	4 800	1 400
Combustibles usés CU1	Nombre d'assemblages				54 000
	Nombre de colis de stockage				13 500
	Volume des colis de stockage m ³				82 000
	Nombre d'alvéoles				3 900
Combustibles usés CU2	Nombre d'assemblages		5 400	5 400	4 000
	Nombre de colis de stockage		5 400	5 400	4 000
	Volume des colis de stockage m ³		7 500	7 500	5 500
	Nombre d'alvéoles		1 800	1 800	1 300

Concernant les colis types CU3, considérés à titre exploratoire en marge des scénarios du modèle d'inventaire (et, pour mémoire, moyennement exothermiques) leur stockage représenterait au total, toutes familles confondues, 120 alvéoles pour 2 170 colis de stockage.

6.1.4.2 Flux de colis

Comme indiqué au chapitre 3, pour les colis fortement exothermiques, les hypothèses de flux de mise en stockage sont proches des flux de production de déchets. Pour les colis peu ou moyennement exothermiques, on a, à ce stade des études, pris en compte des flux considérés comme « raisonnables » du point de vue de la réalisation et de l'exploitation du stockage.

Les flux annuels des différents types de colis sont rappelés dans le Tableau 6.1.2, qui indique également les ordres de grandeur de durée de mise en stockage (en supposant une exploitation continue à flux régulier).

Tableau 6.1.2 Flux annuels de colis

	Nombre de colis primaires traités par an ⁹⁹	Nombre de colis de stockage produits par an	Durée d'exploitation
Colis peu ou faiblement exothermiques			
Déchets B	5 000	1 400	40 ans (scénarios S1) 30 ans (scénario S2)
Colis moyennement exothermiques			
Déchets C0	400	400	10 ans
Combustibles usés CU3	400	150	15 ans
Colis fortement exothermiques			
Déchets C1 C2 C3 C4	600 à 700	600 à 700	55 ans (scénarios S1) 15 ans (scénario S2)
Combustibles usés CU1	1 500	350	35 ans
Combustibles usés CU2	150	150	35 ans (scénario S1) 25 ans (scénario S2)

6.1.4.3 Autres flux

Du fait de la concomitance de l'exploitation du stockage et des travaux de construction, les principaux flux engendrés par ces activités apparaissent comme un élément essentiel de dimensionnement de l'architecture, en particulier les flux de déblais liés à l'excavation et les flux de béton liés à la mise en place du revêtement des galeries. Les travaux de fermeture engendrent de même d'importants flux de remblai.

Les flux liés à la construction sont déterminés d'une part par la construction des modules de stockage décrits au chapitre 5, à savoir les alvéoles et les galeries d'accès à partir desquelles elles sont creusées, et d'autre part par la construction des galeries qui assurent les liaisons entre les puits et les modules de stockage. Ces dernières représentent une part significative des flux de construction. Compte tenu de l'étape actuelle du projet, on ne peut donner que des ordres de grandeur.

Compte tenu des rythmes conventionnels retenus ci-dessus, les « valeurs caractéristiques » des volumes excavés annuels varient suivant les types de colis. Pour les colis B, ce chiffre se situe autour de 50 000 m³ par an¹⁰⁰. Ces volumes sont sensiblement plus élevés pour les colis très exothermiques : de l'ordre de 80 000 m³ par an pour les colis C, 120 000 m³ par an pour les colis CU2 et jusqu'à 300 000 m³ par an pour les colis CU1, alors qu'ils sont non significatifs pour les colis moyennement exothermiques C0 (et CU3), dont la quantité est faible. Ces chiffres constituent des ordres de grandeur

⁹⁹ Ou nombre d'assemblages ou d'étuis de combustibles usés.

¹⁰⁰ Volume excavé en place. Du fait du foisonnement de la roche abattue, le volume à transporter est environ 50 % supérieur.

autour desquels les valeurs effectives peuvent fortement fluctuer¹⁰¹ selon les décisions prises dans la gestion du stockage.

Avec les hypothèses prudentes actuellement prises pour le revêtement des galeries, les flux de béton représentent environ 50 % des flux d'excavation. En ce qui concerne les remblais, des cadences de remblayage de l'ordre de 200 000 m³ de galerie remblayée par an sont envisageables. Il ne s'agit toutefois pas d'une valeur définie pour le stockage, mais d'un ordre de grandeur possible.

Les infrastructures doivent également être conçues pour permettre le passage d'autres flux qui circulent dans le stockage, tels que les matériaux de construction (acier pour le soutènement, barrière ouvragée) ou les consommables nécessaires au fonctionnement des engins.

Les flux de ventilation, largement déterminés par les besoins de l'exploitation et surtout de la construction, peuvent atteindre ou dépasser 500 m³/s, et, constituent par ailleurs un élément essentiel du dimensionnement des installations souterraines.

6.2 Conception d'ensemble

6.2.1 Organisation générale du stockage

Le souci d'assurer l'indépendance des différentes catégories de colis, exprimé au paragraphe 6.1.1.5 conduit à les isoler dans des zones distinctes (déchets B, C0, C, et le cas échéant les combustibles usés) [37].

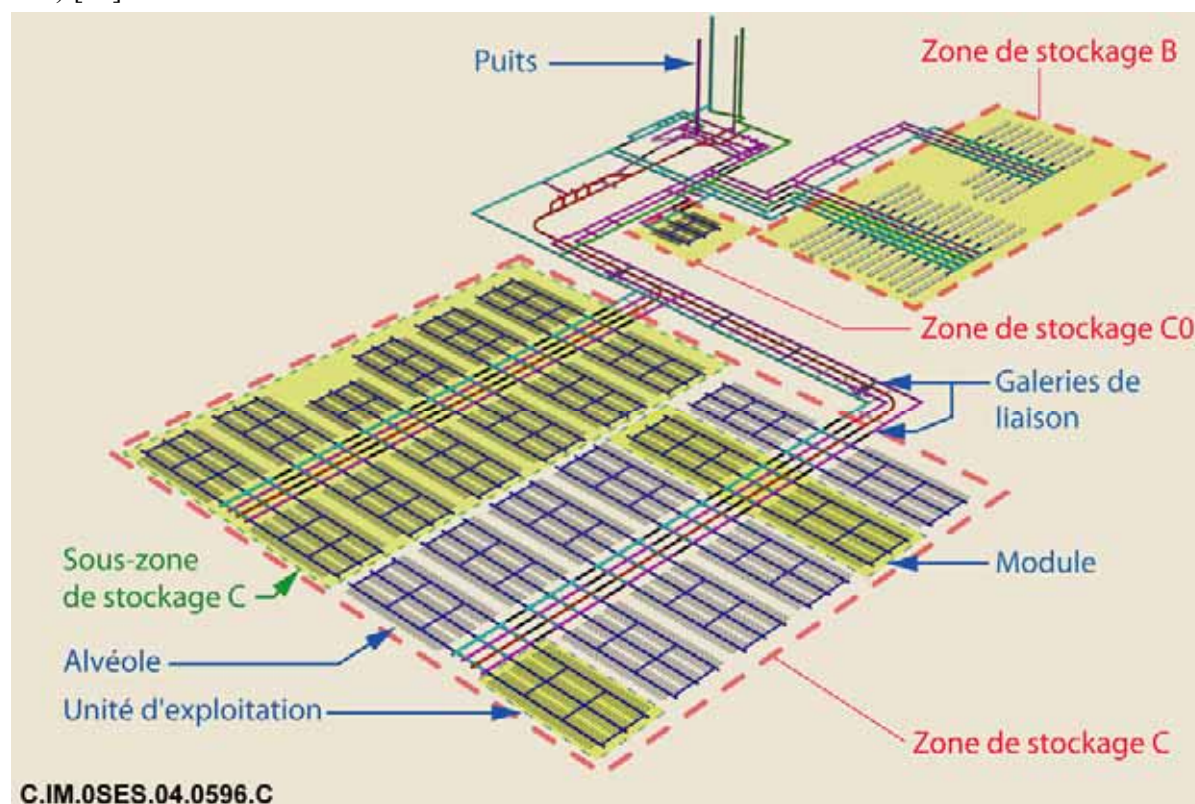


Figure 6.2.1 Organisation générale du stockage

¹⁰¹ Dans une fourchette de l'ordre de $\pm 50\%$

6.2.2 Modularité des zones de stockage

Pour répondre aux besoins de fractionnement dictés par 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 subdivisées de façon arborescente en *sous-zones*, *modules*, *unités d'exploitation* et *alvéoles*.

Ainsi, le besoin de flexibilité de construction et d'exploitation a conduit à diviser, en fonction de l'importance des inventaires de colis de déchets C et, le cas échéant, de combustibles usés, chaque zone de stockage correspondante en 2 à 4 *sous-zones*, regroupant chacune plusieurs *modules*.

Les *modules* constituent les éléments de base du fractionnement du stockage justifié par la sûreté à long terme. Chaque zone est ainsi divisée en au moins une dizaine de modules¹⁰².

Sur le plan de l'organisation opérationnelle, les modules peuvent être subdivisés en *unités d'exploitation*, dans laquelle ne s'exerce qu'un seul type d'activité (construction, exploitation ou fermeture) pendant une période de plusieurs mois ou années.

Dans la zone de déchets B, chaque module est constitué d'une *alvéole* et de sa *galerie d'accès*, et correspond à une *unité d'exploitation*. Dans les zones de stockage de déchets C (ou de combustibles usés), chaque module regroupe plusieurs dizaines d'*alvéoles*. Dans l'architecture présentée ici, un module est subdivisé en deux *unités d'exploitation*.

Les unités d'exploitation sont construites et exploitées au fur et à mesure des besoins du stockage, au rythme d'une unité tous les 1 à 2 ans suivant les zones. Quand les durées de construction ou d'exploitation sont plus longues que cette périodicité, plusieurs unités d'exploitation peuvent être en construction ou en exploitation simultanément dans la même zone.

Le détail de l'agencement des différentes zones de stockage est donné ci-après aux paragraphes 6.2.5 et 6.2.6.

Pour assurer le fractionnement, chaque module est isolé du reste des installations souterraines par un ou plusieurs scellements au moment de la fermeture.

6.2.3 Accès aux zones de stockage

6.2.3.1 Les puits d'accès au stockage

La liaison entre les installations de surface et les installations souterraines est réalisée par un ensemble de puits communs à l'ensemble des zones de stockage. La disposition retenue favorise la maîtrise du fonctionnement hydraulique à long terme du stockage :

- les puits sont regroupés dans une même zone d'environ 200 mètres de rayon, excentrée par rapport aux zones de stockage ;
- la zone des puits est connectée aux infrastructures de liaison du stockage par un ensemble de galeries parallèles à la contrainte géotechnique majeure. Ces galeries parallèles seront munies de scellements lors de la fermeture du stockage.

Le détail de la description des puits est donné à la section 7.3.

6.2.3.2 Les galeries de liaison

Les modules de stockage sont reliés aux puits par les *infrastructures de liaison*, constituées de faisceaux de *galeries de liaison* parallèles, dont le nombre varie suivant l'importance des flux à gérer. Cet ensemble est hiérarchisé en *galeries de liaison principales*, qui relie la zone des puits aux différentes sous-zones du stockage, et en *galeries de liaison secondaires*, à l'intérieur de chaque sous-zone. Cette hiérarchisation facilite la souplesse de construction et d'exploitation du stockage en rendant indépendantes les différentes sous-zones. Une spécialisation des galeries entre *galeries de*

¹⁰² Pour les zones regroupant un inventaire faible, le nombre de modules peut être inférieur à 10.

transfert des colis, galeries de travaux et, suivant les besoins, *galeries de retour d'air*, contribue à la gestion de la coactivité entre les activités nucléaires et les activités de génie civil.

Le détail de la description et de la conception des galeries de liaison est donné à la section 7.4.

6.2.4 Agencement général du stockage

6.2.4.1 Positionnement dans la formation argileuse

À ce stade, l'Andra a retenu une implantation de l'ensemble des modules de stockage en partie médiane de la formation du Callovo-Oxfordien. Cette option assure une même garde d'argilite entre le stockage et les formations carbonatées sus et sous jacentes¹⁰³. En effet, il n'y a pas de variation verticale significative des paramètres gouvernant la rétention et la solubilité des radionucléides, entre les différents lithofaciès de la formation ; le modèle conceptuel du Callovo-Oxfordien adopte ainsi des valeurs identiques de ces paramètres pour les différents horizons lithologiques ([75] et [76] – Chapitre 6).

La partie médiane présente des caractéristiques mécaniques moindres que d'autres parties de la formation du Callovo-Oxfordien. Cela confère à l'étude un caractère conservatif au plan de la faisabilité géotechnique du stockage.

Le pendage de la couche étant au maximum de 3 %, la direction de ce pendage n'est pas déterminante pour la conception de l'architecture générale.

6.2.4.2 Topologie des éléments du stockage

La topologie prise en compte vise à favoriser le fonctionnement hydraulique à long terme du stockage. L'architecture du stockage constitue une arborescence d'éléments borgnes, depuis les alvéoles jusqu'aux puits. À tous les niveaux de l'arborescence, on accède à chaque élément du stockage par des accès peu nombreux et regroupés.

À ce stade des études, la prise en compte de cette topologie d'architecture permet d'en montrer la faisabilité, malgré les contraintes qu'elle induit, en particulier du point de vue ventilation.

6.2.4.3 Agencement des galeries

Les galeries et alvéoles sont disposées suivant un maillage rectangulaire. Toutes les galeries et alvéoles devant recevoir un scellement peuvent ainsi être orientées parallèlement à la contrainte horizontale majeure pour limiter l'endommagement de l'argilite dans le voisinage des scellements.

¹⁰³ Dans une perspective d'optimisation, cette option pourrait être revue en tenant compte (i) du comportement géomécanique des différents lithofaciès de la formation (ii) des temps de migration d'éléments toxiques dans les formations encaissantes.

6.2.5 Description de la zone de stockage de déchets B

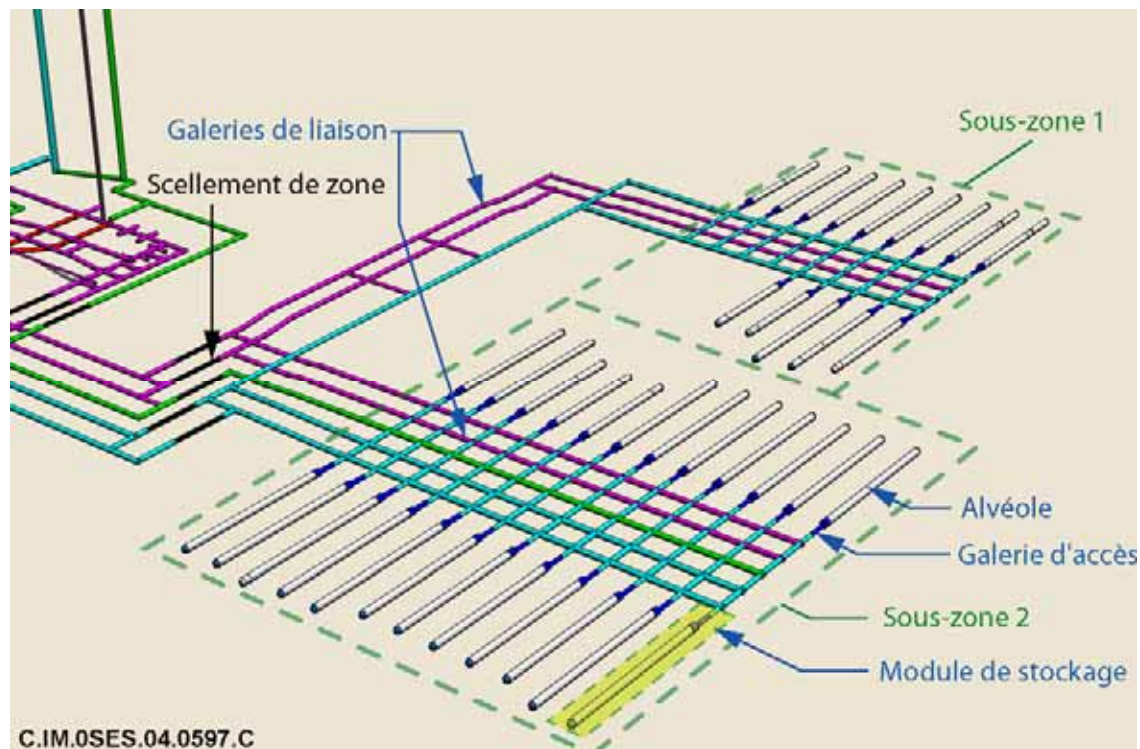


Figure 6.2.2 Organisation de la zone de stockage B

Les colis B présentant des caractéristiques physico-chimiques différentes sont stockés dans des modules distincts (voir chapitre 5). Sur la Figure 6.2.2, on a regroupé dans la sous-zone 1 les colis ne contenant pas de matière organique.

L'espacement des alvéoles entre elles est défini par le dimensionnement géotechnique. L'entraxe entre alvéoles retenu ici est de 72 mètres, de façon à laisser entre deux alvéoles de 12 mètres de diamètre excavé un pilier égal à au moins 5 fois le diamètre des alvéoles de manière à assurer une bonne stabilité.

Le scellement de la zone B par bouchons d'argile est réalisé dans des tronçons de galeries orientés parallèlement à la contrainte horizontale majeure. Les scellements situés dans les galeries d'accès aux alvéoles assurent le fractionnement de la zone en modules comportant chacun une alvéole. Les scellements situés dans les galeries de liaison permettent de séparer la zone B des autres installations du stockage.

6.2.6 Description des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés

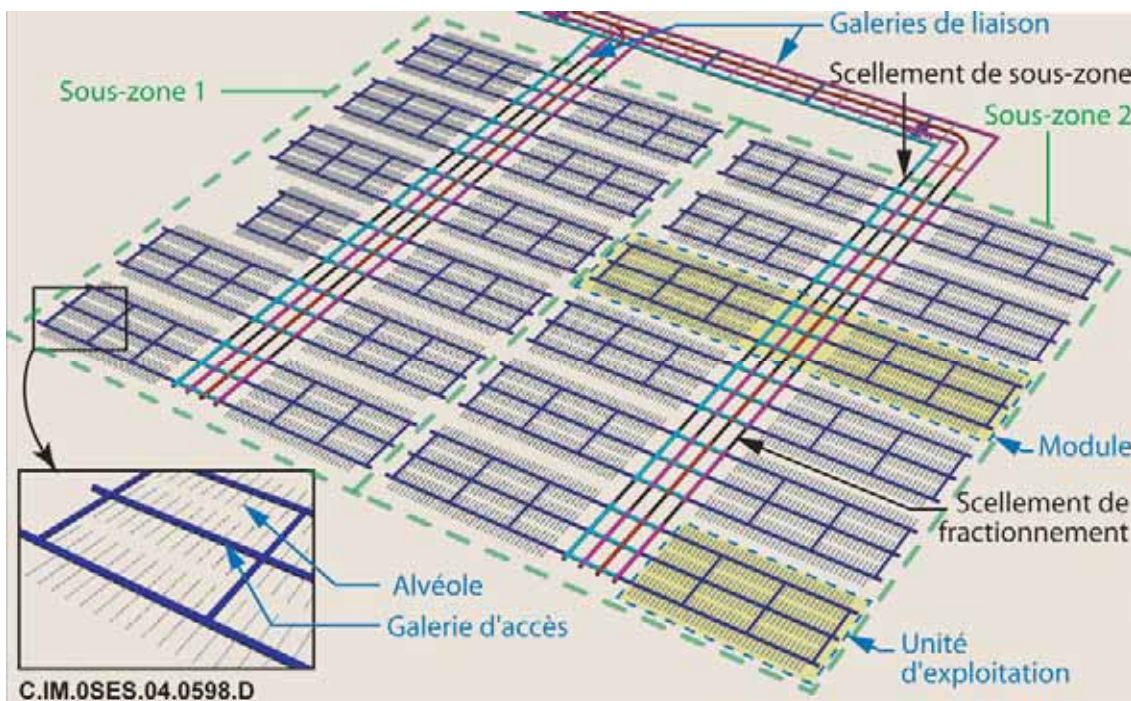


Figure 6.2.3 Organisation d'une zone de stockage C (ou CU)

Les zones de stockage des déchets C (et de combustibles usés le cas échéant) obéissent à une organisation similaire. Leur conception et leur dimensionnement sont très fortement conditionnés par les considérations thermiques.

Pour faciliter l'organisation de leur construction, de leur exploitation et de leur fermeture, ces zones sont divisées en sous-zones, chacune étant découpée en 8 à 12 unités d'exploitation.

Chaque unité d'exploitation regroupe de 80 à 220 alvéoles. L'espace des alvéoles entre elles est défini par le dimensionnement thermique (voir chapitre 5).

Les unités d'exploitation sont constituées de 3 galeries parallèles, les *galeries d'accès aux alvéoles*, raccordées aux galeries de liaison. Ces galeries d'accès sont reliées entre elles par des galeries perpendiculaires, les *recoupes*. Cette disposition en triplets de galeries permet d'assurer une grande sécurité de fonctionnement de l'aérag, même en cas d'incendie.

Le scellement de la zone C par bouchons d'argile est réalisé dans des éléments d'ouvrage orientés parallèlement à la contrainte horizontale majeure.

- **Cas particulier des colis C0 (et CU3)**

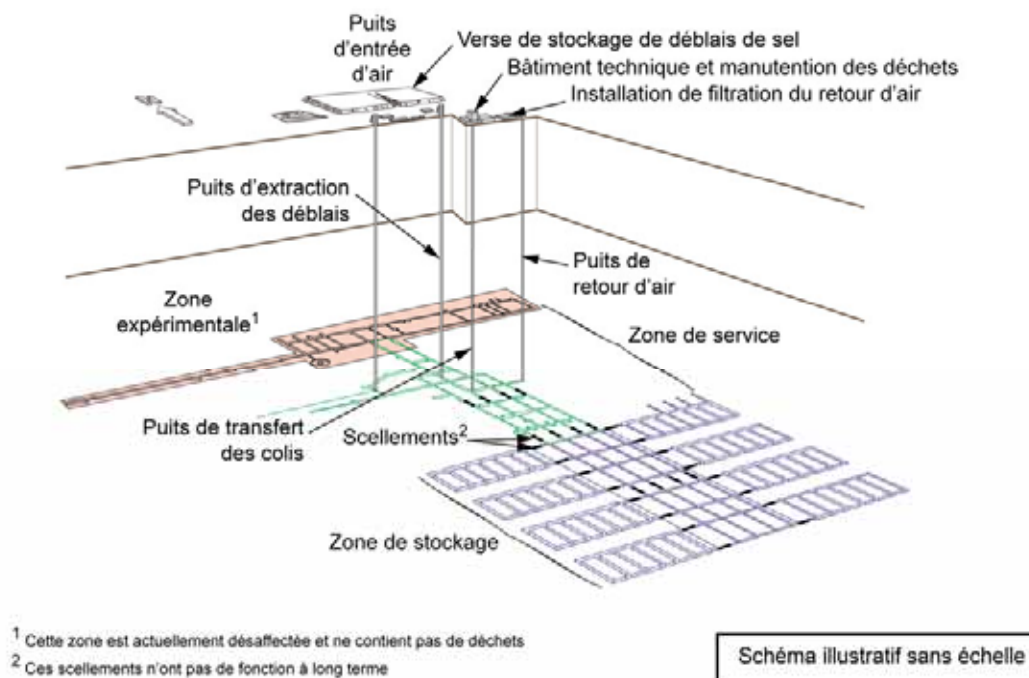
Les colis C de type C0, sensiblement moins exothermiques que les autres colis C, font l'objet d'une sous-zone spécifique, ne comportant qu'un module. On notera qu'il en serait de même pour des combustibles type CU3, le cas échéant.

6.2.7 Adaptabilité à une éventuelle discontinuité du milieu

Aucune faille n'a été détectée par les travaux de reconnaissance de la formation du Callovo-Oxfordien. La modélisation géologique conduit à considérer que cette situation est extrapolable à l'ensemble de la zone de transposition introduite dans [6] - Tome 1. Cela conduit à décrire une architecture régulière. Toutefois, on notera que la modularité de l'architecture permettrait de s'adapter à une hypothèse (considérée, avec l'avancée des connaissances sur le site, comme peu vraisemblable) où le stockage intercepterait une fracture secondaire, qui présenterait une transmissivité hydraulique supérieure à celle de l'argilite saine. Cette fracture serait en tout état de cause détectée au plus tard lors des reconnaissances précédant ou accompagnant la réalisation des galeries de liaison. L'architecture pourrait alors être adaptée : une garde d'argilite, hectométrique, serait maintenue entre cette faille et les modules de stockage les plus proches ; de plus, les galeries de liaison approchant ou traversant la fracture pourraient être scellées lors de la fermeture du stockage.

6.2.8 Éléments de comparaison internationale

Aux Etats-Unis, le Department of Energy exploite depuis 1999 un stockage souterrain de déchets radioactifs, le WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), implanté à une profondeur de 650 m dans une couche de sel. C'est la seule installation souterraine de stockage de déchets radioactifs à vie longue actuellement en service dans le monde. La Figure 6.2.4 donne une vue perspective de ces installations [77].



C.IM.0SES.05.0150.A

Figure 6.2.4 Vue perspective du stockage souterrain du WIPP

Cette architecture et l'organisation sous-jacente des travaux présentent plusieurs points communs avec celles présentées dans ce chapitre :

- zone de stockage modulaire, construite progressivement en fonction des besoins de stockage ;
- réseau de plusieurs galeries de liaison spécialisées permettant la coactivité entre les activités nucléaires et les activités de génie civil ;
- puits regroupés assurant la liaison entre les installations de surface et les installations souterraines.

6.3 Facteurs de dimensionnement de l'architecture

Parmi les facteurs de dimensionnement de l'architecture du stockage, on peut distinguer (i) les facteurs géotechniques, qui se traduisent par des contraintes sur les dimensions et les espacements des alvéoles et des galeries, (ii) les facteurs thermiques, qui se traduisent aussi en termes de distances, (iii) les facteurs hydrauliques qui se traduisent en termes de disposition géométrique et topologique de certains éléments d'architecture [37].

6.3.1 Aspects géotechniques

Du point de vue de l'architecture du stockage, le dimensionnement géotechnique intervient, au-delà du dimensionnement du soutènement et du revêtement de chaque ouvrage (galerie, alvéole), pour définir une distance minimale séparant les ouvrages. Sachant que l'influence d'une galerie isolée sur les terrains ne se fait pas sentir au-delà de deux diamètres à une échelle de temps pluriséculaire, on a retenu une distance entre galeries ou alvéoles parallèles égale à au moins cinq fois leur diamètre pour assurer l'indépendance mécanique entre ouvrages. La stabilité de chaque ouvrage pris individuellement permet alors d'assurer la stabilité d'ensemble de la zone. À ce stade des études, il n'a pas été tenu compte de l'effet de « bande ferme » qui tend à reporter le poids des terrains sus-jacents sur les bandes de terrain laissées vierges en bordure des zones d'excavation, diminuant ainsi les contraintes s'exerçant sur les galeries ou alvéoles.

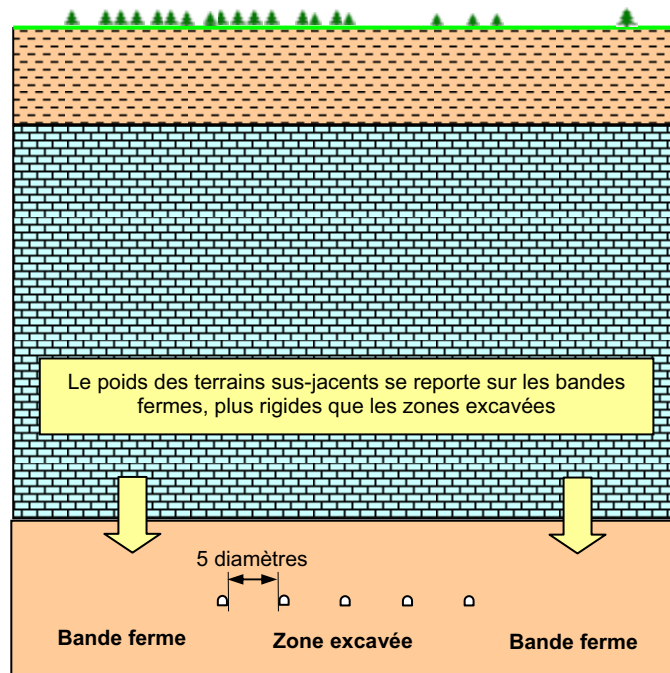


Figure 6.3.1 Distance entre ouvrages, effet de « bande ferme »

Cette distance minimale entre ouvrages s'applique à l'ensemble des alvéoles et des galeries. On notera que pour les alvéoles contenant des colis moyennement ou fortement exothermiques, la distance entre alvéoles est avant tout déterminée par des considérations thermiques.

On rappelle que, à très long terme, s'il y a dégradation des revêtements, la limitation des vides résiduels laissés dans les alvéoles de stockage et dans les galeries remblayées s'oppose à une propagation de l'endommagement de l'argilite [78].

6.3.2 Comportement thermique du stockage

La limitation de la température dans le stockage repose sur le dimensionnement des modules de stockage présenté au chapitre 5. Des interactions entre modules de stockage interviennent néanmoins avec la diffusion de la chaleur dans le milieu. Cette section évalue l'impact de ces interactions et vérifie qu'elles restent compatibles avec l'objectif mentionné plus haut d'une indépendance entre les déchets de différentes catégories.

6.3.2.1 Évolution des températures dans et autour des modules de stockage de déchets de haute activité

Dans une première période de quelques dizaines d'années après la mise en stockage, la température d'un colis ne résulte que de son propre dégagement thermique, et de celui des colis situés à proximité immédiate ; cela est dû à la diffusion lente de la chaleur dans le milieu géologique. À plus long terme, la zone d'influence thermique de chaque colis s'étend progressivement. L'évolution de la température dans les modules de stockage devient alors sensible à l'agencement relatif des modules.

Ainsi, plus un module est étendu, ou proche des modules voisins, plus les colis situés au centre refroidiront lentement. De même, la température de modules situés au cœur de la zone de stockage diminuera plus lentement que celle de modules situés en périphérie.

Les figures suivantes présentent l'évolution des températures à l'échelle de la zone de stockage de déchets C. Cette évolution a été calculée en prolongeant dans le temps les simulations thermiques réalisées par éléments finis tridimensionnels et présentées au chapitre 5.

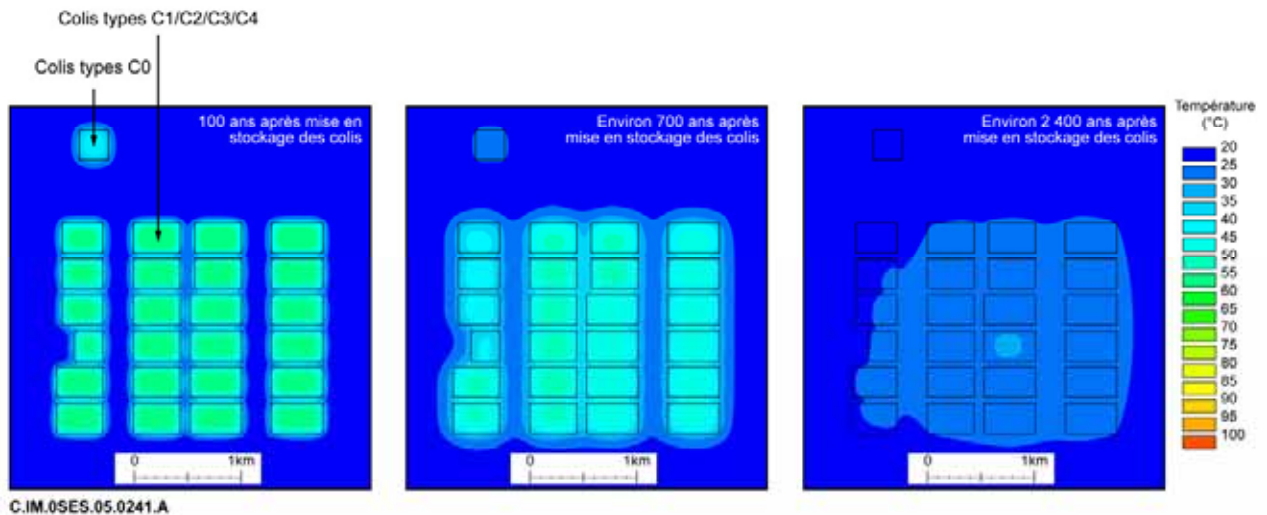


Figure 6.3.2 Evolution des températures dans la zone de stockage de déchets C, dans un plan horizontal (Scénario S1a, mise en stockage des déchets après 60 à 70 ans d'entreposage)

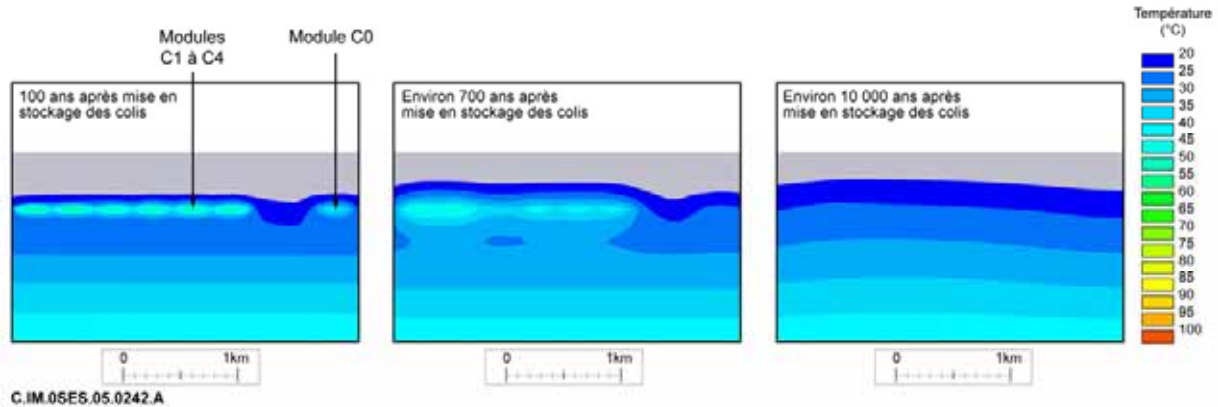


Figure 6.3.3 Evolution des températures autour des modules de stockage de déchets C, dans un plan vertical

À l'échelle séculaire, les modules interagissent peu les uns avec les autres. En revanche, après plusieurs siècles, la température tend progressivement à s'homogénéiser dans la zone de stockage, avec un léger gradient du cœur de la zone vers sa bordure. À l'échelle de la dizaine de milliers d'années, la distribution de température dans et autour de la zone de stockage de déchets C redevient proche du gradient géothermique naturel initial (Figure 6.3.2 et Figure 6.3.3).

Du fait des interactions apparaissant avec le temps entre modules, la période thermique, définie par une température au cœur des colis supérieure à 50 °C environ, dépend de la densité de stockage des colis à l'échelle de la zone de stockage. Cette densité fait intervenir les distances entre modules.

On notera la décroissance plus rapide de la température dans la partie du stockage regroupant les colis types C0 (voir le chapitre 3) due à une exothermicité inférieure de ces colis ; la distance considérée entre cette partie du stockage et les autres modules assure une indépendance thermique.

6.3.2.2 Indépendance thermique des différentes zones de stockage

L'indépendance thermique de la zone de stockage de déchets B, par rapport aux zones de stockage de déchets C et, le cas échéant, de combustibles usés, a aussi été vérifiée. L'influence d'une telle zone située à une distance de 250 mètres d'une alvéole de stockage de déchets B est inférieure à 4 °C. Le pic thermique correspondant intervient plusieurs milliers d'années après la mise en stockage.

Au sein des déchets B, les colis de type B2 (déchets bitumés) s'ils sont en eux-mêmes très faiblement exothermiques, sont très sensibles à la température. On a ainsi vérifié que la distance entre les alvéoles contenant des colis B2 et celles contenant d'autres colis permet de maintenir la température des colis B2 au-dessous de 30 °C.

La Figure 6.3.4 montre par exemple l'élévation de la température au-dessus de la température initiale de la roche (égale à 22 °C) dans une alvéole de colis B2.1, dont l'extrémité se situerait à 100 mètres d'une alvéole de colis B faiblement exothermiques (B3 par exemple : bien que la puissance thermique des colis types B3 à la mise en stockage soit inférieure à celle des colis types B5, l'influence d'une alvéole B3 sur les alvéoles voisines est plus importante car la puissance thermique des colis types B3 décroît moins vite dans le temps).

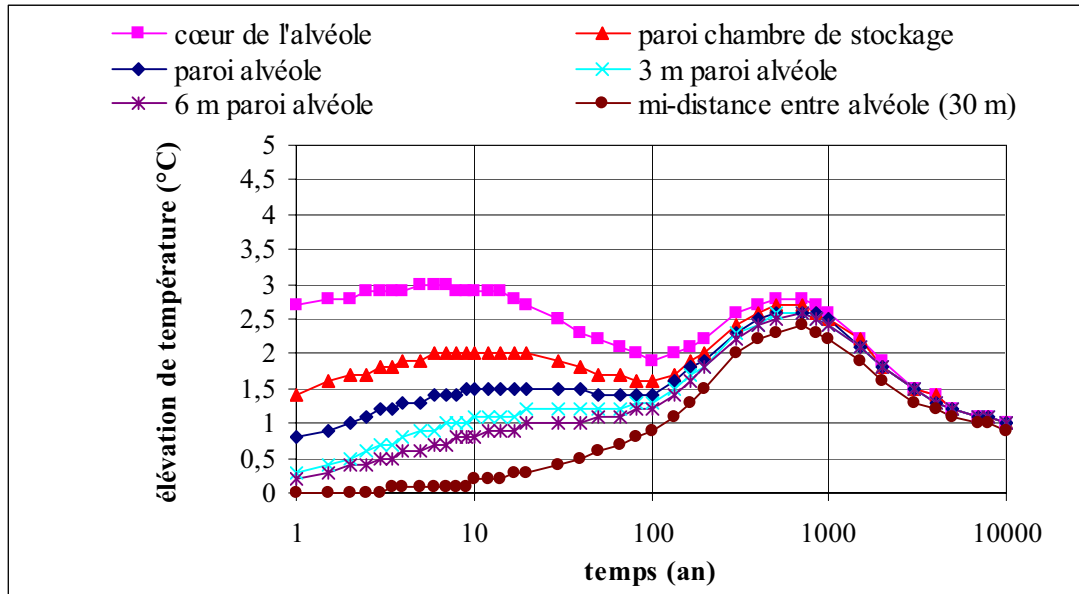


Figure 6.3.4 *Élévation de la température dans une alvéole de déchets type B2.1 en fonction du temps*

Dans cette configuration, un premier pic de température se produit moins de dix ans après le stockage des colis. Ce pic est provoqué par la puissance thermique propre des colis B2.1, qui est très faible. Après plusieurs siècles, un deuxième pic est provoqué par le flux thermique provenant des colis B3 voisins [10].

6.3.3 Comportement hydraulique du stockage

La limitation des écoulements dans le stockage repose avant tout sur les qualités du site (faible perméabilité de l'argilite, faibles gradients). Comme indiqué plus haut, l'architecture étudiée y contribue, de manière complémentaire avec la topologie générale et les scellements ; elle peut ainsi renforcer la robustesse du fonctionnement hydraulique du stockage.

Cette section présente les principes simples du fonctionnement hydraulique du stockage et illustre la contribution de l'architecture à la robustesse de ce fonctionnement.

Pour ce faire, les différentes situations qui se succèdent sont exposées : d'abord les phases transitoires de désaturation, puis de resaturation et de rééquilibrage des pressions, conséquences de la réalisation même du stockage ; puis le régime permanent à plus long terme [8], [79].

Après retour à l'équilibre hydraulique, il convient de distinguer (i) les flux d'eau drainés par le stockage dans l'argilite (ii) ceux qui pourraient être captés par les puits à la traversée des formations sus-jacentes.

On retient ici de décrire ces flux par la loi de Darcy, qui constitue un modèle enveloppe pour la formation argileuse¹⁰⁴.

6.3.3.1 La situation hydraulique à la fermeture du stockage et la resaturation

A l'état naturel, la couche du Callovo-Oxfordien est saturée en eau. L'eau peut s'y déplacer verticalement sous l'effet de la différence de charge entre les formations géologiques sus et sous-jacentes (Oxfordien et Dogger). Sa vitesse de déplacement est très lente, du fait de la très faible perméabilité de la formation. Pour un gradient de charge moyen dans la couche du Callovo-Oxfordien de l'ordre de 0,2 mètre par mètre, le déplacement vertical naturel de l'eau s'effectue¹⁰⁵ à raison de

¹⁰⁴ Ce modèle tend à surestimer les flux pour les très faibles perméabilités.

¹⁰⁵ Pour mémoire, cette vitesse de drainage est inférieure à la vitesse de diffusion des solutés dans l'eau

quelques centimètres par centaine de milliers d'années. Les flux correspondants sont de quelques centaines de litres par kilomètre carré d'emprise horizontale.

Au cours de la phase d'exploitation et d'observation du stockage, le creusement des ouvrages et leur ventilation provoquent une décharge hydraulique qui s'accompagne d'une désaturation des argilites au voisinage des ouvrages. Lorsque l'on ferme le stockage, les galeries sont progressivement remblayées, des scellements sont construits de part en part et la ventilation est stoppée.

Il s'ensuit une phase de resaturation du stockage, contrôlée par la faible perméabilité de la formation argileuse : c'est elle qui détermine le flux d'eau entrant dans le stockage. Il faut aussi noter l'influence de la production de gaz par corrosion anoxique des métaux présents dans les ouvrages après la fermeture de ces derniers, qui tend à ralentir la resaturation ; en effet, cette réaction entre le fer et l'eau peut s'amorcer avant que les ouvrages ne soient complètement resaturés, dès lors qu'il n'y a plus d'oxygène gazeux.

Les différences entre ouvrages en matière de volume des vides à remplir d'eau (alvéoles remplies de colis, remblais de galeries...), les cinétiques différentes de production de gaz et les différences de propriétés hydriques des matériaux poreux (bentonite, béton, remblai) induisent des différences dans le temps de resaturation des différents ouvrages par les argilites [8] [62]. Les scellements prévus dans la conception constituent des freins aux circulations hydrauliques dans le stockage (bouchons d'alvéoles et scellements des galeries de liaison) ; d'autres l'isolent hydrauliquement des formations sus-jacentes (scellements de puits et des galeries de la zone des puits). Ces scellements limitent ainsi les écoulements d'eau à l'intérieur des installations souterraines. Compte tenu de ces éléments, les durées de resaturation peuvent varier de quelques dizaines d'années à quelques dizaines de milliers d'années suivant les ouvrages.

6.3.3.2 Les flux d'eau drainés dans l'argilite, après retour à l'équilibre hydraulique

Lorsque la resaturation est près de s'achever, les déplacements potentiels d'eau dans l'argilite s'organisent à nouveau de façon unidirectionnelle, de la formation encaissante de plus forte charge hydraulique vers celle de moindre charge.

Les flux d'eau circulant ainsi dans les argilites sont susceptibles d'être interceptés par les alvéoles de stockage et par les galeries d'accès et de liaison. À l'échelle du stockage, le flux total intercepté est proportionnel à la surface cumulée des ouvrages (galeries et alvéoles). Il est évalué¹⁰⁶ à quelques mètres cubes par an.

Si le stockage présente globalement une perméabilité faible, proche de celle des argilites, le flux d'eau intercepté par chaque ouvrage (alvéole contenant des colis ou galerie) est restitué à l'argilite sans circuler le long des galeries et des puits.

La conception du stockage vise à se rapprocher de cette situation. Pour ce faire, l'implantation de scellements dans les puits et dans les galeries oppose à la circulation de l'eau une grande résistance hydraulique. Grâce à ces scellements, la présence du stockage modifie peu le régime hydraulique de la formation géologique. Il ressort que dans le cas d'un gradient ascendant, seule une faible fraction des flux interceptés par le stockage s'évacue par les galeries et les puits ; elle est évaluée pour une perméabilité des scellements de puits de 10^{-11} m/s à quelques centaines de litres par an, pour l'ensemble du stockage. Ce faible débit rend négligeable la vitesse de l'eau dans les ouvrages. La migration des radionucléides relâchés par les colis s'effectue donc essentiellement par diffusion et non par entraînement convectif dans le flux d'eau. Ces radionucléides vont alors migrer préférentiellement dans la couche du Callovo-Oxfordien plutôt que par les galeries vers les puits.

Dans une situation où l'on ne prendrait pas en compte le rôle des scellements de galeries et de puits (cela correspondrait à une situation de défaillance totale ou partielle des scellements), le stockage n'opposerait plus de résistance (ou une résistance moindre) à la circulation de l'eau.

¹⁰⁶ Pour un gradient hydraulique vertical de 0,2.

Dans le cas d'un gradient de charge ascendant, une telle situation se traduirait par une augmentation des flux d'eau qui s'évacuerait par les galeries et les puits de liaison plutôt que par l'argilite. Ainsi, pour un gradient ascendant de l'ordre de 0,2 et en l'absence de scellements le flux évacué par les galeries représenterait 2 à 3 m³/an.

Bien que ce débit reste faible dans l'absolu, l'Andra a adopté une topologie d'architecture permettant d'en réduire l'impact sur le relâchement et la migration des radionucléides : il s'agit de limiter localement la part de flux circulant dans et à proximité de chaque alvéole de stockage.

La topologie adoptée est une arborescence d'éléments borgnes, dont le principe est illustré par la figure suivante. Les éléments borgnes à différents niveaux de l'arborescence ont été représentés en rouge, depuis l'alvéole individuelle jusqu'à la zone de stockage. À chaque niveau de l'arborescence, on accède à chaque élément par des accès peu nombreux et regroupés.

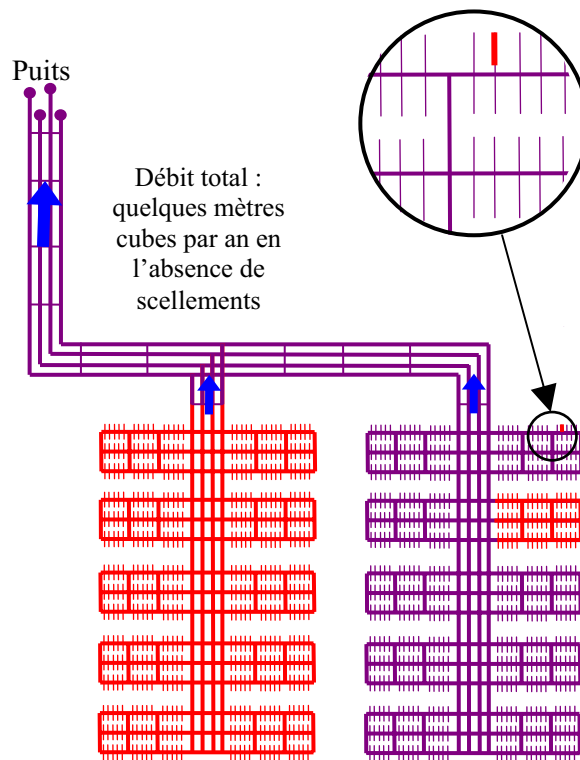


Figure 6.3.5 Arborescence d'éléments borgnes

Le flux d'eau drainé dans chaque élément borgne se limite à celui que cet élément peut échanger avec l'argilite. Les éléments d'un même niveau d'arborescence se trouvant en parallèle sur la trajectoire de l'eau, on évite dans chaque élément l'arrivée de flux en provenance d'autres éléments. Ainsi, les flux circulant dans les ouvrages, et corollairement les vitesses de convection, sont faibles au plus près des alvéoles ; les flux drainés ne se regroupent que progressivement, vers les galeries de liaison principales et les puits.

On notera que ce principe autorise une flexibilité sur la configuration de détail des ouvrages, par rapport à l'architecture présentée.

6.3.3.3 Les flux d'eau captés par les puits dans les formations sus-jacentes

Selon le sens du gradient de charge entre l'Oxfordien et le Dogger, des puits de liaison pourraient capter des flux d'eau dans les formations géologiques traversées, et les amener dans le stockage. Ces flux s'ajouteraient alors à ceux drainés dans l'argilite. Les scellements prévus dans ces puits, et répétés

dans les galeries, évitent ce processus, par la résistance hydraulique qu'ils opposent à la circulation de l'eau.

Si l'on ne prend pas en compte le rôle de ces scellements (situation de défaillance), le regroupement des puits et leur implantation à l'écart des zones de stockage permettent néanmoins de limiter le flux d'eau qui serait capté dans les formations sus-jacentes, et qui pourrait s'écouler dans les galeries [80].

Cette option est à comparer avec celle de puits distants tels que présentés par le schéma a de la Figure 6.3.6. Une différence de charge entre des puits distants pourrait induire un écoulement en U traversant le stockage, et le mettrait en communication avec les formations sus-jacentes. Dans cette situation, les flux d'eau captés par les puits ne seraient pas limités par la faible perméabilité de l'argilite.

Au contraire, une faible distance entre puits supprime la possibilité d'un écoulement en U. En cas de gradient ascendant dans la zone des puits (schéma b), aucun flux d'eau ne serait capté dans les formations sus-jacentes. En cas de gradient descendant, le flux capté par un puits non ou mal scellé serait limité par la faible perméabilité de la formation étudiée et resterait du même ordre que celui intercepté dans l'argilite. Ainsi, il n'y aurait pas de conséquence notable sur le relâchement de radionucléides par les colis, et ce flux ne constituerait pas un vecteur de migration de ces éléments.

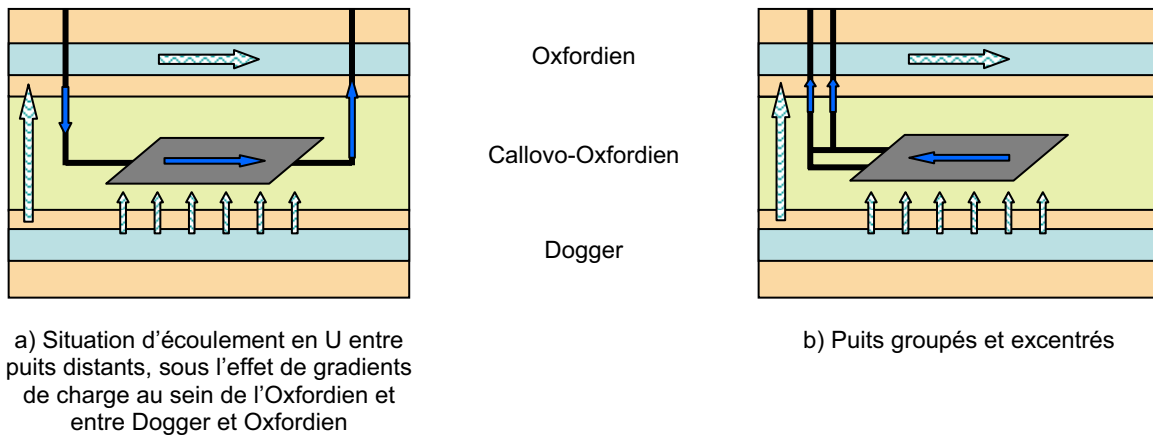


Figure 6.3.6 Disposition des puits et limitation des écoulements

6.4 Logique de construction et d'exploitation d'ensemble du stockage

La section 6.3 a montré que l'architecture présentée visait à répondre aux questions de sûreté à long terme. La présente section décrit un ensemble de disposition permettant, tout en assurant une séparation physique des différentes activités, d'assurer la construction progressive du stockage. Un point particulier concerne la ventilation, qui constitue un élément essentiel de dimensionnement des infrastructures du stockage.

6.4.1 La séparation des activités

Le principe de séparation des travaux de construction et de l'exploitation « nucléaire » a conduit à dédier certaines infrastructures à l'une ou l'autre de ces activités.

Les infrastructures affectées aux activités d'*exploitation nucléaire* (transfert des colis) sont constituées du *puits de transfert des colis*, de galeries de *transfert des colis* qui assurent la liaison entre le puits et les unités d'exploitation, et des *galeries d'accès* aux alvéoles, situées à l'intérieur des unités d'exploitation.

Les infrastructures affectées aux *travaux* de construction (et de fermeture) comprennent le *puits de travaux* et des *galeries de travaux*.

La Figure 6.4.1 illustre un exemple possible de simultanéité d'activités de travaux et d'exploitation.

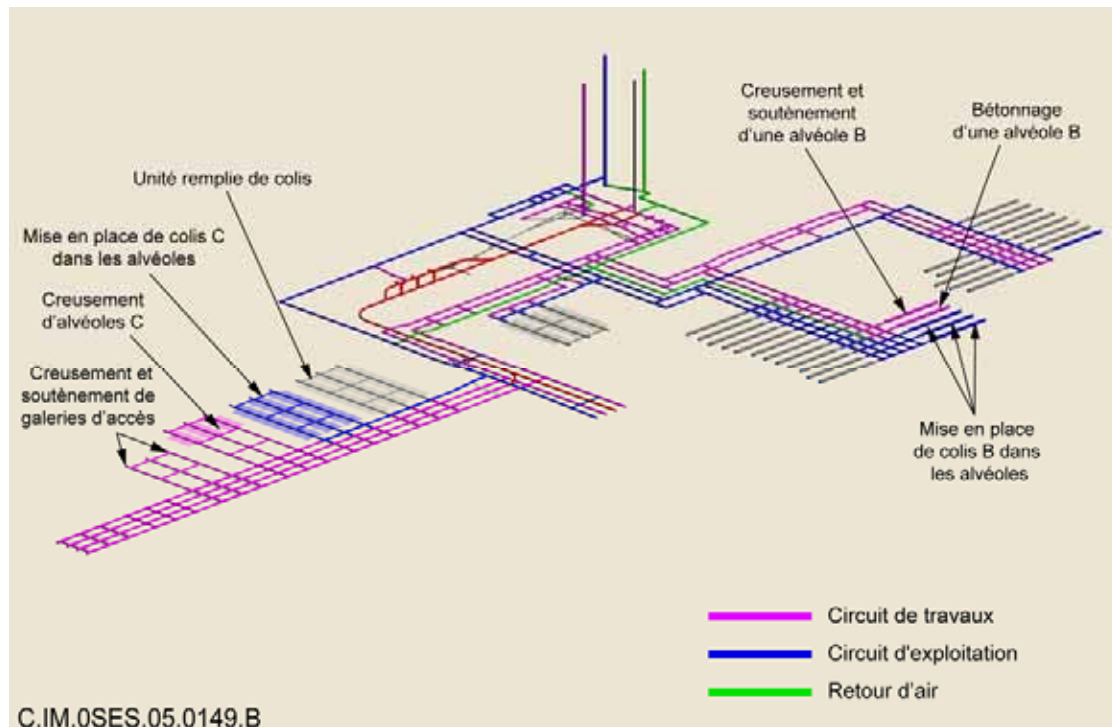


Figure 6.4.1 Séparation des circuits d'exploitation et de travaux

6.4.2 La progressivité de la construction et de l'exploitation d'une zone de stockage

Cette section présente une organisation possible des activités de construction et d'exploitation.

● Rôle de l'unité d'exploitation

L'organisation des activités s'articule sur la division de la zone de stockage en unités d'exploitation. On rappelle que dans la zone de stockage des déchets B chaque unité d'exploitation est constituée d'une seule alvéole avec sa galerie d'accès. Dans la zone de stockage des déchets C (et, le cas échéant, dans une zone de stockage de combustibles usés), une unité d'exploitation regroupe plusieurs dizaines d'alvéoles desservies par un ensemble de trois galeries d'accès.

Dans une même unité d'exploitation, on n'exerce qu'un seul type d'activité à la fois : construction ou exploitation nucléaire.

● Organisation séquentielle des travaux

Ainsi, une unité d'exploitation passe successivement par une phase de construction puis par une phase d'exploitation.

Dans l'espace, plusieurs unités d'exploitation peuvent être actives simultanément dans des phases différentes. Pour synchroniser des phases de durées différentes, on peut ajuster le nombre d'unités d'exploitation dans chaque phase. Par exemple, si la phase de construction dure deux fois plus longtemps que la phase de mise en place de colis, deux unités d'exploitation pourront être en construction pendant qu'une unité est en exploitation.

À titre d'illustration, la Figure 6.4.1 montre en premier plan la situation d'une zone de stockage de colis C dans laquelle deux unités d'exploitation sont en cours de construction, une unité est en phase d'exploitation nucléaire, et une unité est remplie de colis.

● **Progression des travaux**

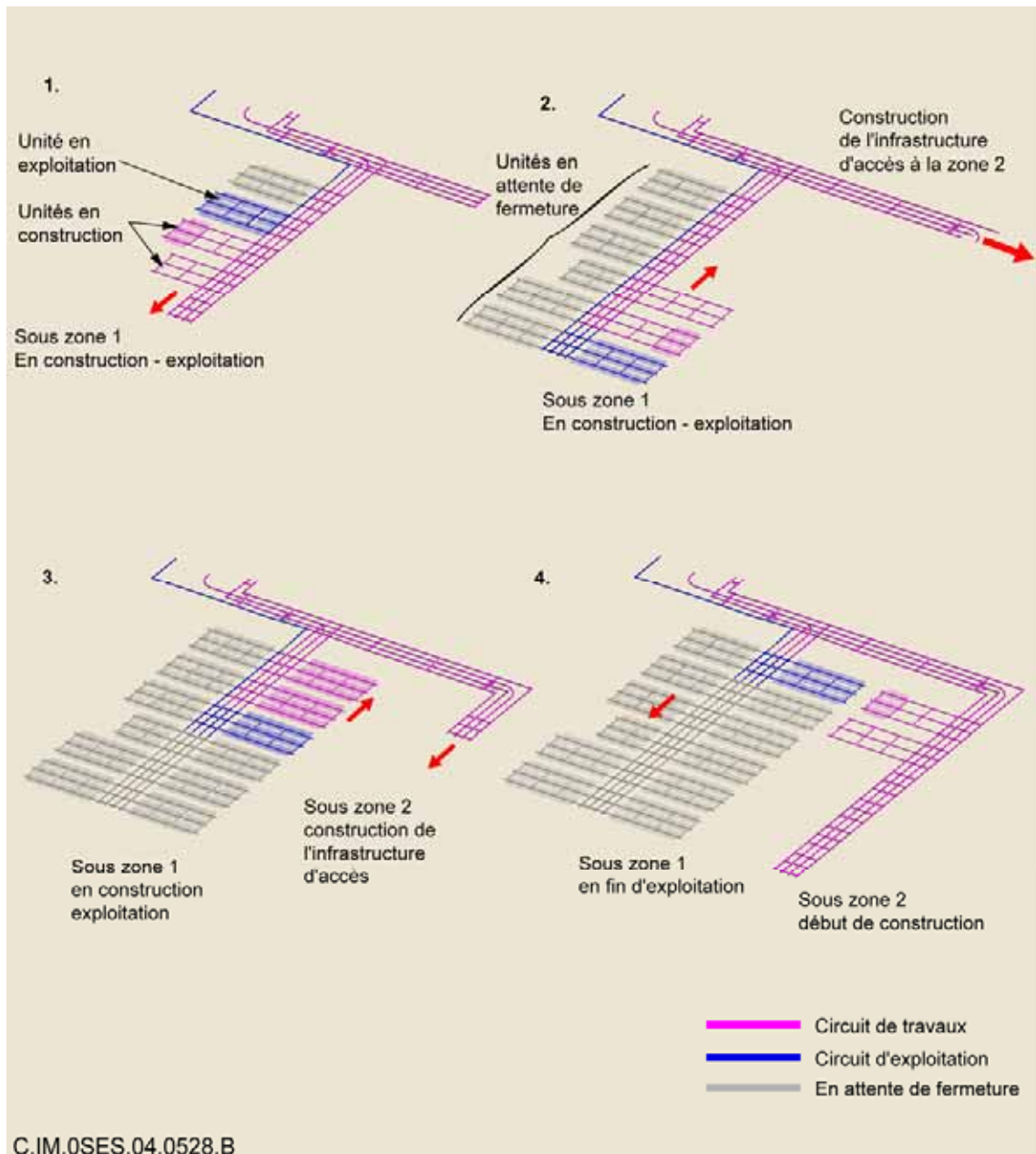


Figure 6.4.2 *Etapes de la construction et de l'exploitation d'une zone de stockage de déchets C*

Depuis l'entrée d'une zone, les travaux des unités d'exploitation progressent d'un seul côté de l'infrastructure de liaison, d'abord en s'éloignant des puits (en « chassant », suivant la terminologie minière). Une fois atteinte l'extrémité de l'infrastructure de liaison, les travaux progressent de l'autre côté de celle-ci, en se rapprochant des puits (en « rabattant », suivant la terminologie minière). Cette progression est illustrée par schémas 1 et 2 de la Figure 6.4.2. La combinaison des méthodes chassantes et rabattantes à l'intérieur d'une même sous-zone permet de simplifier la gestion des activités simultanées de construction et d'exploitation car elle évite les croisements de flux de travaux et d'exploitation. Elle est actuellement mise en œuvre industriellement au WIPP (États-Unis)¹⁰⁷.

¹⁰⁷ Si l'intensité des travaux et de l'exploitation est relativement faible, comme dans la sous-zone 1 de la zone B, une stratégie purement « chassante » est envisageable

Les infrastructures de liaison sont également construites de façon progressive, en avance de la construction des unités de travail. Cette avance est illustrée par les schémas 2 à 4 de la Figure 6.4.2 et peut varier suivant l'organisation des travaux.

6.4.3 L'organisation des activités de construction

Outre les chantiers de construction proprement dits, l'activité de construction nécessite d'importants transports de déblais, de béton et d'autres matériaux. Ces transports se font à travers les galeries d'accès et à travers les puits. Le béton et les autres matériaux sont préparés dans les installations de surface. Les déblais sont stockés dans une verse (voir chapitre 8).

Les transports de déblais et de béton (ainsi que les transports de remblais lors des travaux de fermeture) sont des transports de masse, qui peuvent être effectués par camion ou par voie ferrée. À ce stade des études, on a privilégié l'utilisation des camions pour les distances courtes et les flux modérés et l'utilisation du rail pour les distances élevées et les flux importants.

Les autres transports pourront être assurés par véhicules sur pneumatiques, bénéficiant de la souplesse de ce moyen de transport.

En fonction des distances, des types de véhicules et de la place disponible dans les galeries, le mode de propulsion peut être diesel ou électrique à caténaies, à batteries ou à câble.

La Figure 6.4.3 montre un exemple d'organisation du transport des déblais. La présence de trémies et de silos permet s'assurer l'interface entre des modes de transports différents tels que voies ferrées et puits.

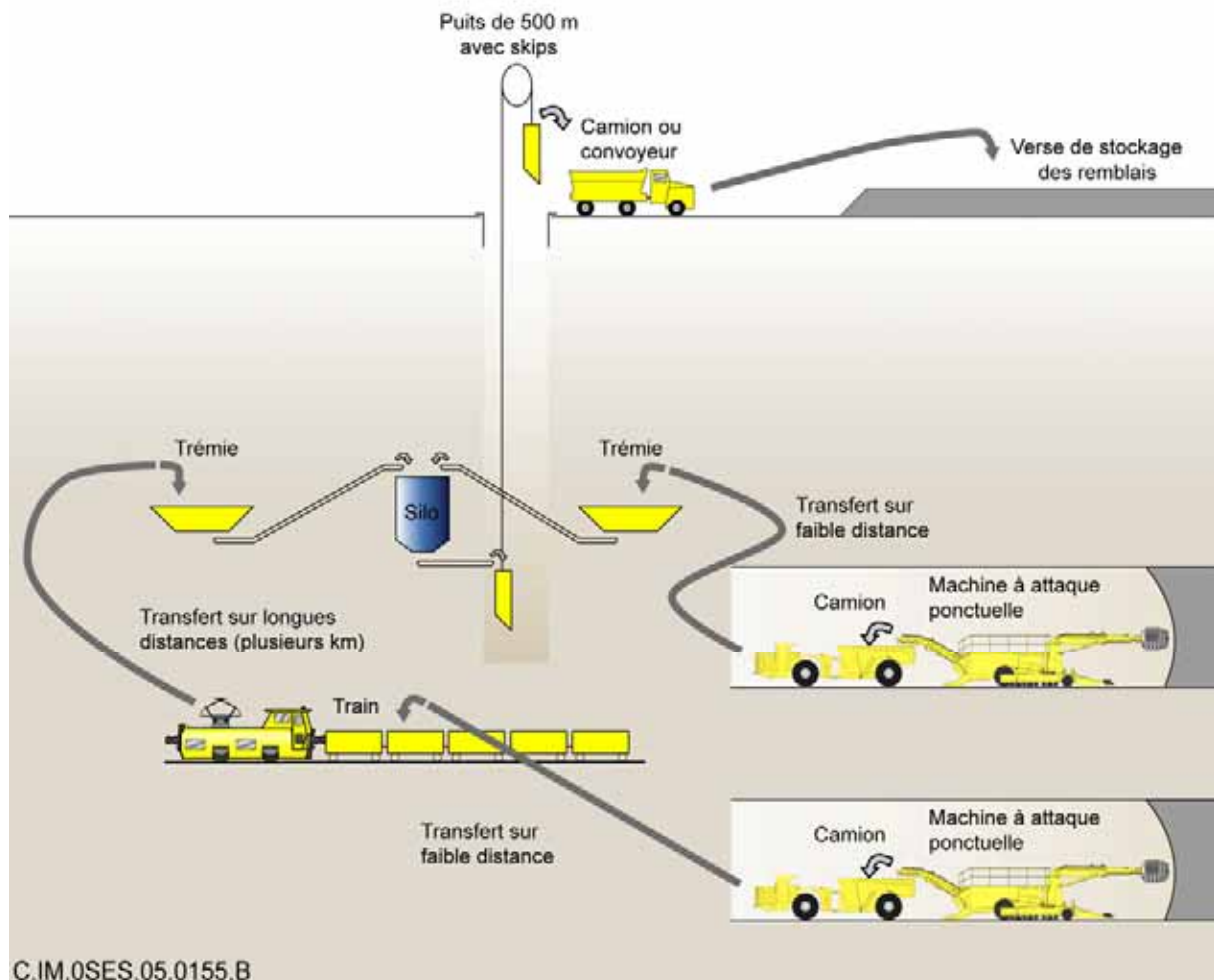


Figure 6.4.3 Synoptique du transport des déblais

La fabrication du béton peut être réalisée en surface. Celui-ci est ensuite transféré au fond dans le puits de travaux, par gravité en tuyauterie (technique utilisée en particulier pour la construction des puits de mine) ou par trémies malaxieuses descendues dans la cage du puits. Dans les galeries, le béton peut être transporté par trémies malaxieuses sur camion (jusqu'à 1 à 2 km) ou par train (au-delà de 2 km). À proximité du chantier, il est ensuite mis en place par pompage.

6.4.4 La ventilation

La présente section présente une organisation possible de la ventilation, permettant d'assurer les fonctions d'hygiène et de sécurité incendie.

Du fait de l'architecture arborescente, on est amené à constituer de longs culs-de-sac (jusqu'à plusieurs kilomètres). Cette géométrie génère de fortes pertes de charges aérauliques qui sont prises en compte dans la conception du système de ventilation.

6.4.4.1 Principes de conception

● Conception générale de la ventilation des installations souterraines

Trois grands principes de conception de la ventilation des installations souterraines ont été retenus :

Un circuit de ventilation primaire assuré par des ventilateurs situés en surface

La circulation de l'air dans les installations souterraines est assurée essentiellement par des ventilateurs situés en surface, ventilateurs soufflants en tête des puits de personnel et de service et ventilateurs aspirants en tête du puits de retour d'air. Cette disposition assure que les arrivées d'air frais sont toujours en surpression par rapport aux retours d'air ou au désenfumage.

Une arrivée d'air en pleine section et un retour en gaine ou en galerie dédiée

L'air frais entrant balaie les galeries souterraines sur toute leur section sans conduit dédié. Cela concerne tant les galeries liées à l'exploitation nucléaire que celles affectées aux activités de construction.

Le retour d'air et le désenfumage sont réalisés dans des gaines situées en voûte des galeries ou, quand le gabarit des engins circulant dans les galeries est incompatible avec la présence de gaines, dans des galeries exclusivement affectées à ces fonctions.

La Figure 6.4.4 et la Figure 6.4.5 illustrent ces principes de ventilation. En fonctionnement normal, l'air frais circule jusqu'à l'extrémité des galeries à ventiler, et le retour d'air se fait à partir de l'extrémité. En cas d'incendie, l'aspiration des fumées peut se faire par plusieurs trappes assurant une redondance du dispositif de désenfumage.

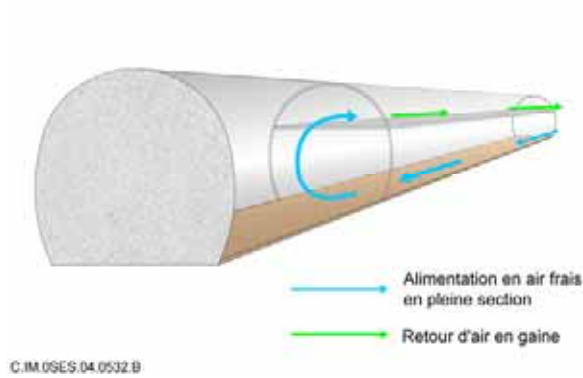


Figure 6.4.4

Principe de fonctionnement de la ventilation avec retour d'air en gaine

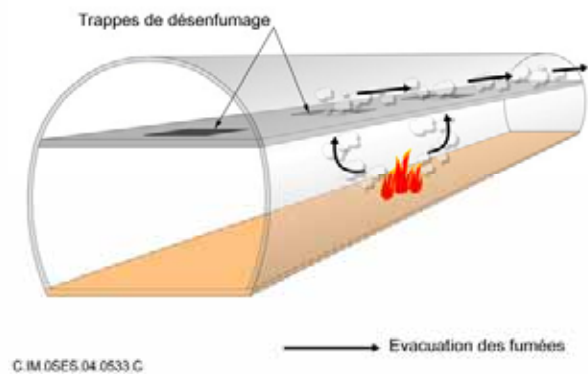


Figure 6.4.5

Principe de fonctionnement d'une gaine de désenfumage

Une séparation des circuits de ventilation

Les galeries d'exploitation nucléaire disposent d'une alimentation en air frais indépendante de celle des galeries de travaux afin d'éviter une introduction de poussières et de fumées engendrées par l'activité de construction. En revanche, les circuits de retour d'air et de désenfumage peuvent être communs pour les deux types de galeries, du fait de l'absence de risque de dissémination de substances radioactives dans les procédés d'exploitation nucléaire mis en œuvre dans les installations de stockage (transfert des colis dans les galeries et mise en place dans les alvéoles).

Le circuit de ventilation du puits de transfert des colis constitue toutefois un circuit séparé, indépendant des autres circuits de ventilation afin de se prémunir des conséquences d'une chute de colis en puits (voir le chapitre 11).

● **Schéma de ventilation**

Le schéma de ventilation (Figure 6.4.6) se compose de plusieurs branches entre les puits d'entrée d'air en surpression et le puits de retour d'air en dépression.

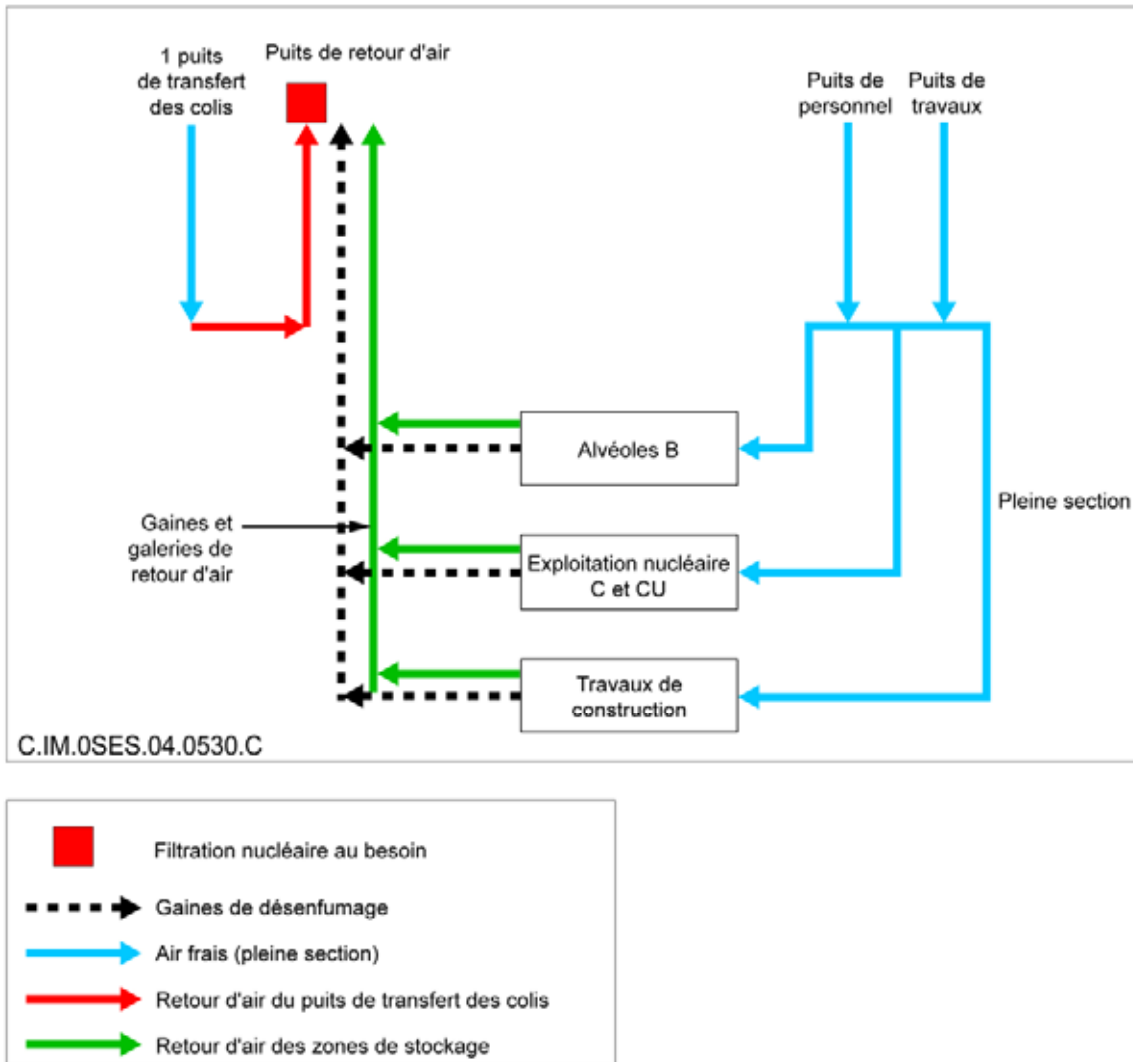


Figure 6.4.6 Principe de ventilation

L'implantation géographique des branches du circuit de ventilation (dont la Figure 6.4.7 montre un exemple) consiste en des réseaux de galeries parallèles pour les entrées d'air. Les retours d'air et le désenfumage sont réalisés, suivant la place disponible dans les galeries de travaux et de transfert des colis, dans des réseaux de gaines ou des galeries de retour d'air.

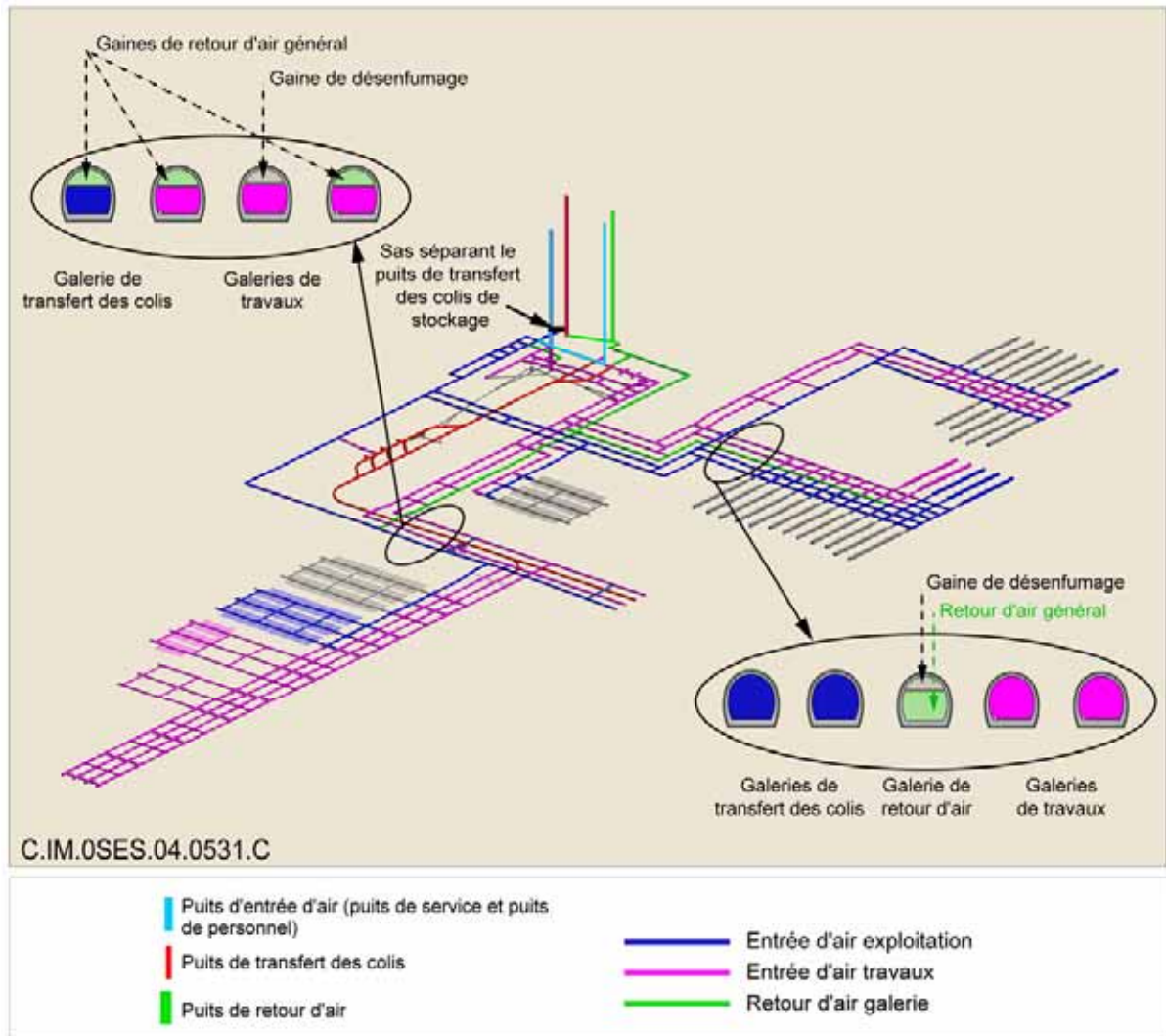


Figure 6.4.7 Organisation de la ventilation (Exemple du scénario S1a)

Une estimation préliminaire des besoins en ventilation donne un débit d'ensemble de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, nécessitant une puissance électrique de l'ordre de 3 MW pour la situation représentée sur la Figure 6.4.7¹⁰⁸.

- **Ventilation de la zone de stockage de déchets B**

Les figures ci-dessous illustrent le système de ventilation de stockage de déchets zone B.

¹⁰⁸ Dans le cas du scénario S2, du fait d'une plus grande intensité des travaux et d'un linéaire de galeries supérieur, ces valeurs pourraient être portés à $650 \text{ m}^3/\text{s}$ et 6 MW respectivement.

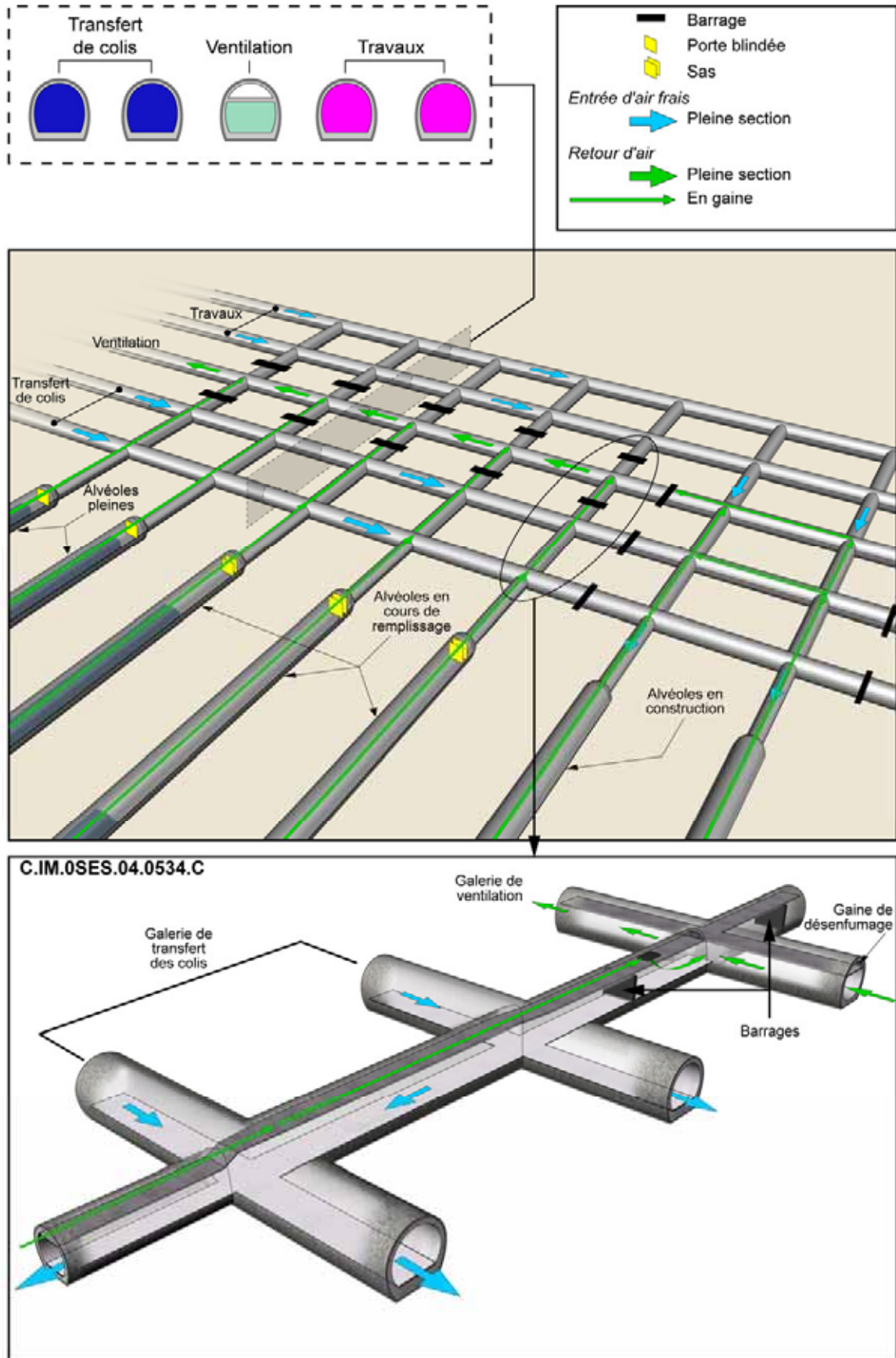


Figure 6.4.8 Ventilation de la zone B

Sur ce schéma, on a représenté une situation où deux alvéoles sont en construction, trois alvéoles en cours de remplissage, et deux alvéoles sont déjà remplies. Des barrages de ventilation séparent trois secteurs :

- le secteur de la construction ;
- le secteur de l'exploitation, qui regroupe les alvéoles en cours de remplissage et celles déjà remplies ;
- le secteur de la galerie de retour d'air, qui comprend deux compartiments : retour d'air général et désenfumage.

L'air frais en surpression arrive en pleine section par les galeries de travaux et par les galeries de transfert des colis pour alimenter leurs secteurs respectifs. L'air des alvéoles est évacué par la galerie de retour d'air en dépression.

6.4.4.2 Ventilation des zones de stockage de déchets C (ou de combustibles usés)

Le schéma ci-dessous illustre le principe de ventilation d'une sous-zone de stockage de déchets C, où les unités d'exploitation sont des triplets de galeries.

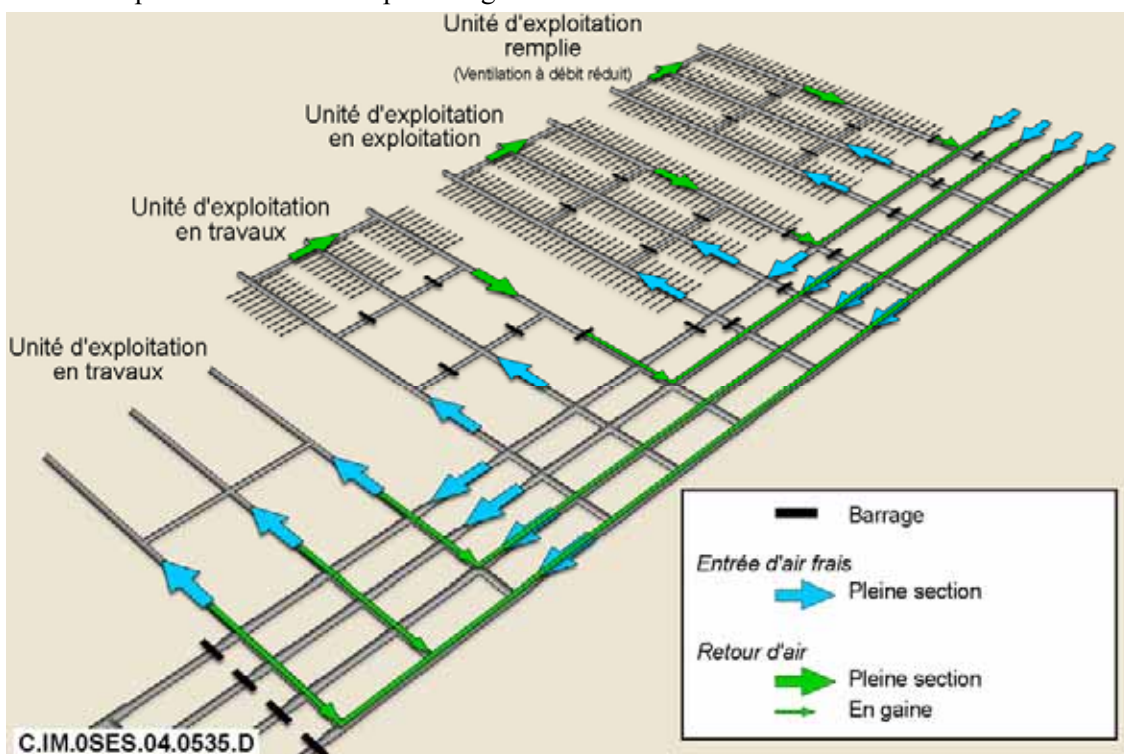


Figure 6.4.9 Ventilation de la zone C

Sur ce schéma, on a représenté une situation où deux unités d'exploitation sont en construction et une unité en phase d'exploitation. On a ainsi deux secteurs d'activité, un secteur de travaux et un secteur d'exploitation. Ces deux secteurs sont séparés par une série de barrages légers, dont certains sont munis de sas pour le passage du personnel d'exploitation¹⁰⁹.

La première unité d'exploitation est en phase de creusement. Des gaines provisoires (ou « ventubes ») permettent d'assurer le retour d'air des chantiers de creusement. La deuxième unité d'exploitation est en phase de creusement d'alvéole, elle est ventilée en pleine section suivant le même principe que celui des unités en exploitation, exposé à la section 5.2.4.

¹⁰⁹ La différence de pression d'air est faible entre ces deux secteurs, et donc compatible avec l'installation de sas.

Les retours d'air des différentes unités d'exploitation sont raccordés aux gaines de retour d'air des galeries de liaison (galeries de travaux ou de transfert de colis). À l'intérieur de la sous-zone, ces gaines permettent d'assurer les fonctions de retour d'air et de désenfumage et sont interconnectées.

Les unités d'exploitation déjà remplies peuvent continuer à être parcourues par une ventilation de faible débit (environ 2 m³/s). Ceci permet de mettre les unités déjà remplies en légère dépression par rapport aux chantiers en activité.

La ventilation de zones de stockage de combustibles usés serait organisée de façon analogue. Du fait des contraintes de gabarit qui empêchent la mise en place de gaines de grande section, le retour d'air serait assuré par une galerie supplémentaire dédiée, le désenfumage étant réalisé par des gaines de faible section.

6.5 Dimensionnement des infrastructures de liaison

Le gabarit des galeries est déterminé par le gabarit des engins circulant dans ces galeries, en particulier les engins de transfert de colis munis de leur hotte et les engins de travaux.

Par ailleurs, la section totale d'un faisceau de galeries parallèles est largement déterminée par les besoins de ventilation : ces vitesses sont d'environ 3 m/s au maximum dans les galeries en entrée d'air, où circule et travaille le personnel, et d'environ 8 à 10 m/s dans les gaines et les galeries de retour d'air pour limiter les pertes de charge du circuit de ventilation.

6.5.1 Diamètre des galeries d'accès et nombre de galeries

Pour répondre à un même besoin de flux, on peut choisir entre un nombre plus réduit de galeries de grandes dimensions, ou un nombre plus important de galeries de petites dimensions. On a retenu à ce stade la seconde option.

Un diamètre utile de 5,7 m en galerie courante permet de passer l'ensemble des flux. Ceci correspond à un diamètre excavé d'environ 7 m (voir le chapitre 7).

Avec ces diamètres de galeries, et suivant le nombre et le type de zones à desservir, les infrastructures de liaison principales comporteront en général 4 à 5 galeries. Ce nombre pourra être augmenté d'une ou deux unités pour les scénarios comportant le stockage de combustibles usés fortement exothermiques. De même, les infrastructures secondaires au sein d'une sous-zone comporteront 4 ou 5 galeries.

6.5.2 Distance entre galeries de liaison

Les distances minimales entre galeries d'un même faisceau sont déterminées par des considérations géotechniques : le pilier séparant deux galeries doit avoir une largeur égale à au moins cinq fois le diamètre excavé des galeries.

6.5.3 Connexions entre galeries de liaison

Dans les infrastructures principales, des recoupes¹¹⁰ de diamètre 2 m, reliant les galeries de liaison tous les 100 mètres environ, permettent le passage de gaines de désenfumage, des recoupes de diamètre 4 m espacées tous les 400 mètres environ permettent l'évacuation des personnels et le passage des véhicules de secours en cas de besoin.

Dans les infrastructures secondaires, les recoupes sont situées au droit des galeries d'accès aux alvéoles.

¹¹⁰ Galerie reliant entre elles des galeries parallèles. Elles sont généralement perpendiculaires aux galeries reliées.

6.5.4 Exemples de dimensionnement préliminaire des infrastructures de liaison

Le dimensionnement préliminaire des infrastructures de liaison est illustré par quelques exemples caractéristiques afin de montrer la faisabilité des principes proposés.

6.5.4.1 Infrastructure de la zone de stockage des colis B

Dans la zone de stockage de déchets B, les flux de travaux de construction sont modérés, alors que les flux de transfert de colis sont plus importants. Les colis de stockage sont relativement encombrants et ne permettent pas la mise en place de gaines de retour d'air de grande section. L'infrastructure comporte cinq galeries, dont une réservée au retour d'air et au désenfumage, deux aux travaux et deux aux transferts de colis.

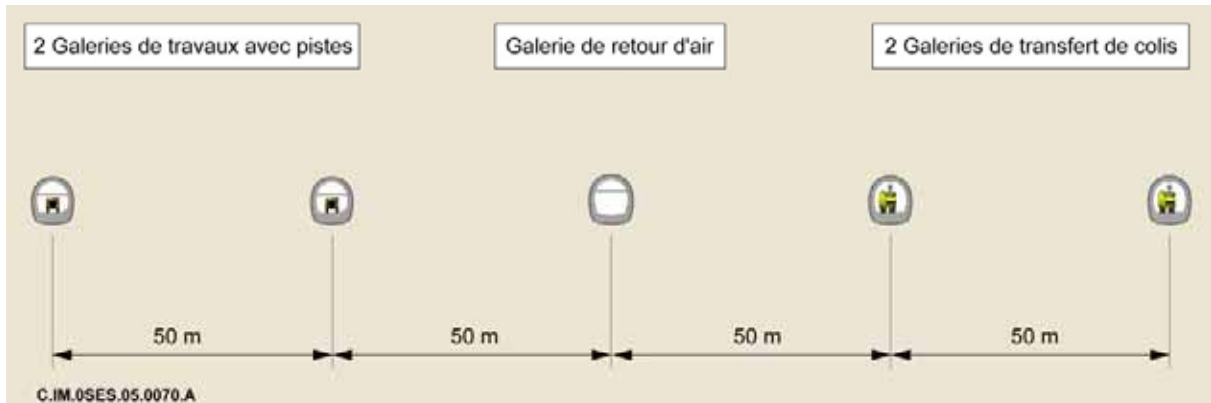


Figure 6.5.1 Infrastructure principale zone B

6.5.4.2 Infrastructure secondaire de la zone de stockage des colis C

Dans la zone de stockage de déchets C, les flux de travaux sont importants, alors que les flux de colis sont plus faibles. Le gabarit des colis et de leur hotte est relativement faible, et toutes les galeries peuvent être équipées de gaines de retour d'air et/ou désenfumage. Il n'y a pas besoin de galerie de retour d'air. L'infrastructure comporte quatre galeries, dont trois réservées aux travaux et une au transfert des colis.

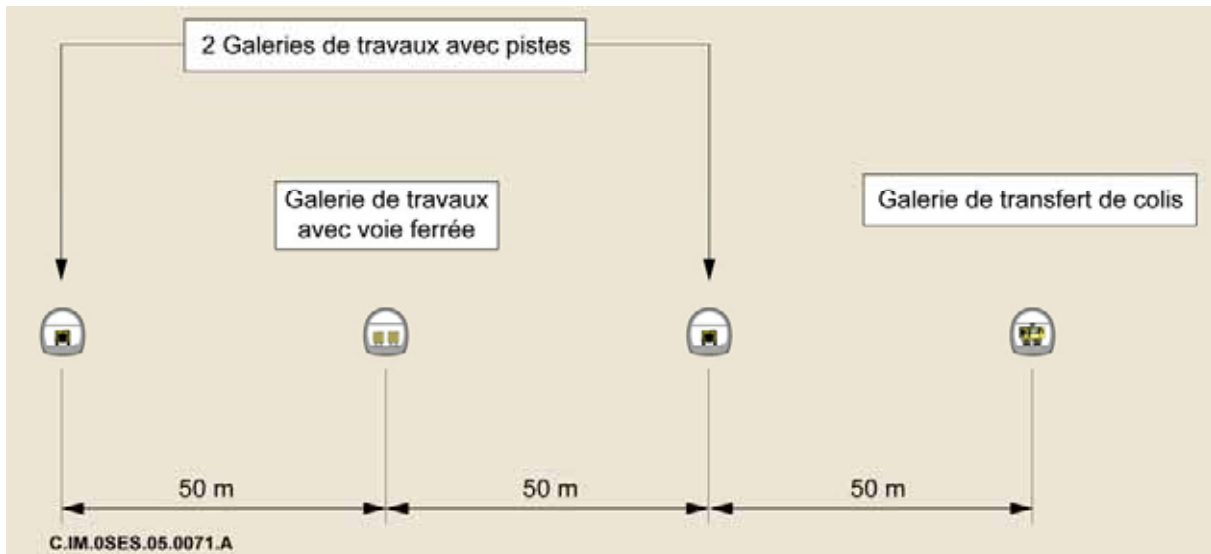


Figure 6.5.2 Infrastructure secondaire zone C

6.5.4.3 Infrastructure secondaire d'une zone de stockage des colis de combustibles usés (CU1)

Dans le cas d'une zone de stockage de combustibles usés (types CU1), les flux de travaux sont plus importants et les flux de colis moindres que pour la zone de stockage des colis C. Les engins de transport utilisés par les travaux¹¹¹ et les engins de transfert des colis auraient des gabarits importants, incompatibles avec la présence de gaines de grande section. L'infrastructure comporte cinq galeries, dont une réservée à la ventilation, trois aux travaux et une au transfert de colis.

6.6 Adaptation de l'architecture souterraine à différents scénarios

Cette section permet d'illustrer la flexibilité de l'architecture vis-à-vis des hypothèses d'inventaires traduites par les scénarios exposés au chapitre 3. Pour un même scénario, l'architecture peut aussi être adaptée selon le déroulement dans le temps de la réception des différentes catégories de colis.

6.6.1 Généralités

Les zones de stockage se distinguent selon le caractère exothermique ou non des colis à stocker :

- les déchets B et C0 sont peu ou moyennement exothermiques, et peuvent être stockés sans période d'entreposage préalable. Les zones de stockage de colis représentent des emprises horizontales et des volumes de travaux de construction relativement faibles. Le dimensionnement de ces zones et des galeries de liaison permettant de les desservir apparaît peu sensible à la date du début de la mise en stockage, ni aux rythmes de construction et d'exploitation ;
- les déchets C autres que C0 et le cas échéant des combustibles usés CU1 et CU2 se caractérisent par une forte exothermicité, qui implique, dans le cadre des concepts étudiés, un entreposage préalable. Les zones de stockage correspondantes représentent des emprises horizontales et des volumes de travaux de construction plus élevés. Le dimensionnement de ces zones de stockage et de leurs galeries de liaison est sensible aux dates de mise en stockage, ainsi qu'aux rythmes de construction et d'exploitation. Enfin, les inventaires de colis correspondant à ces zones peuvent être très différents d'un scénario à l'autre (voir chapitre 3).

Après la phase de construction initiale qui comprend les puits, une partie des infrastructures de la zone des puits et des infrastructures de liaison ainsi que les premières alvéoles de déchets, la construction des ouvrages souterrains de stockage peut se poursuivre de façon progressive. On peut ainsi construire, pour chaque zone de stockage, un complément d'infrastructure nécessaire à la construction de la dite zone. La conception des infrastructures doit donc trouver un équilibre entre la souplesse, qui tend à privilégier des infrastructures de liaison spécifiques à chaque zone et la minimisation des excavations, qui tend à privilégier la mise en commun d'infrastructures.

6.6.2 Présentation de l'architecture d'ensemble d'un stockage pour le scénario S1a

Un exemple d'architecture correspondant au scénario S1a est présenté à la Figure 6.6.1 ci-dessous. La durée de l'entreposage préalable des colis fortement exothermiques correspond à la mise en stockage raisonnablement « au plus tôt » avec les concepts proposés, telle qu'indiquée au chapitre 5 (soit 60 et 70 ans pour respectivement les colis types C1/C2 et C3/C4).

¹¹¹ En particulier les transports d'éléments de barrière ouvragée

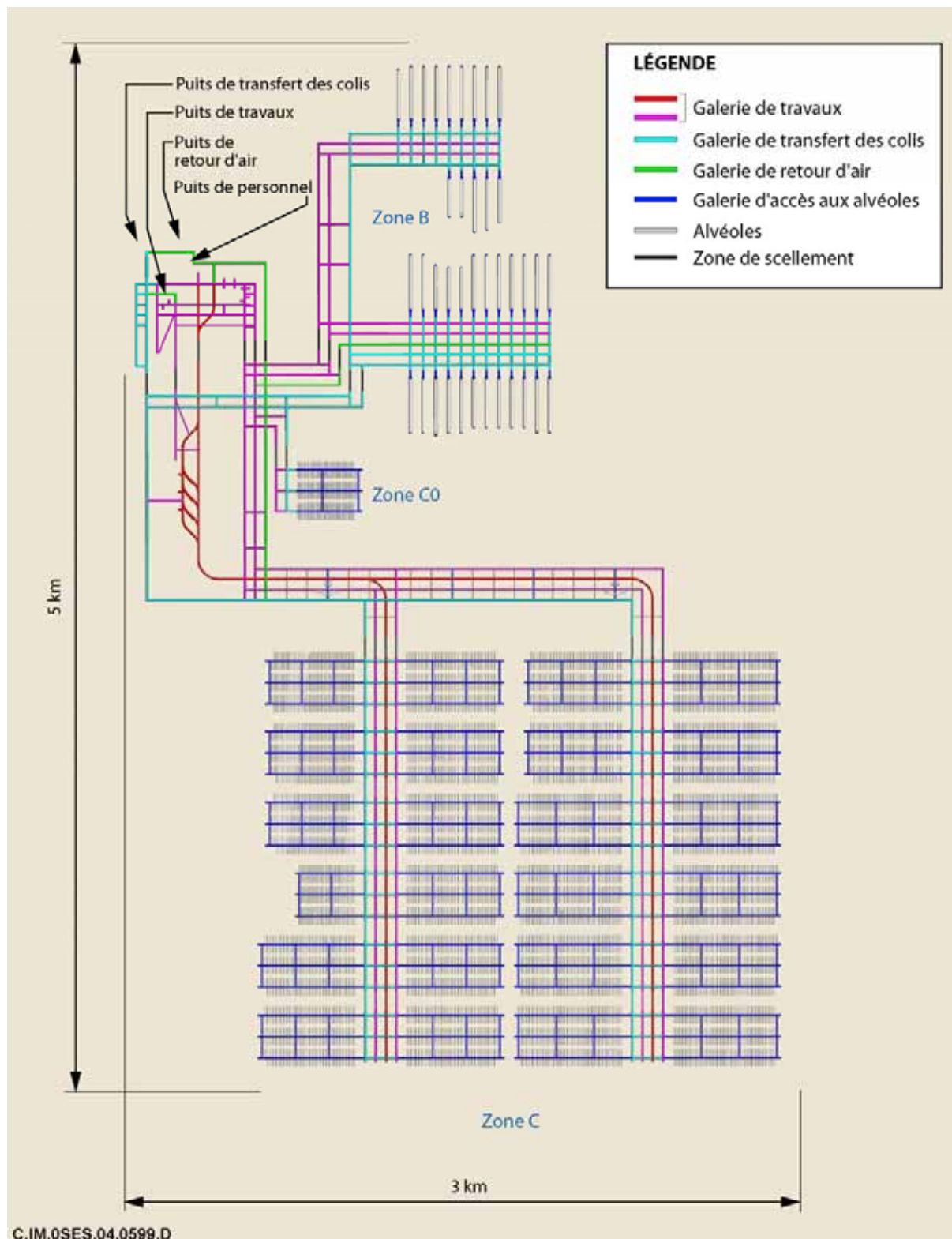


Figure 6.6.1 Principe d'architecture pour le scénario S1a

Le volume excavé total est d'environ 7,6 millions de m³. Ce volume se répartit en 1,9 million de m³ (soit 25 % du total) pour les installations communes, 1,8 million de m³ (soit 23 % du total) pour les déchets B, 0,1 million de m³ (soit 3 % du total) pour les déchets C0 et 3,8 millions de m³ (soit 49 % du total) pour les déchets C. Cette répartition est illustrée par la Figure 6.6.2.

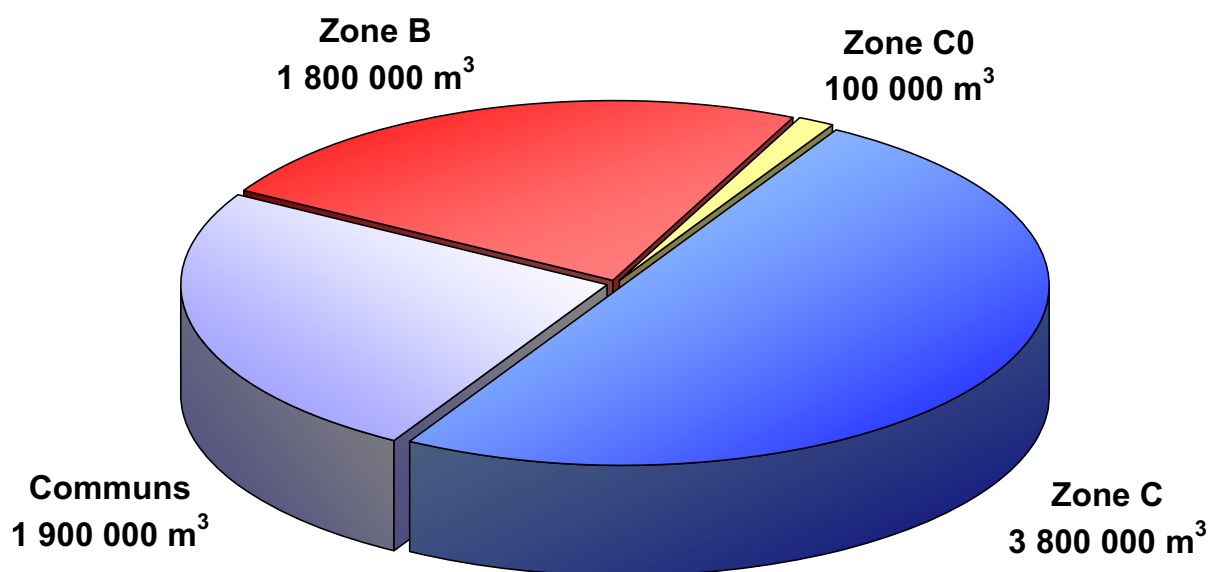


Figure 6.6.2 Répartition des volumes excavés dans le scénario S1a

Environ 40 % de la roche excavée pourra être réutilisée pour le remblayage des galeries. La différence par rapport à 100 % s'explique par les volumes occupés par les colis de stockage et les revêtements des ouvrages et par l'effet de « foisonnement » du remblai¹¹².

Les volumes de matériaux excavés et remblayés peuvent être comparés aux volumes excavés dans des grandes mines souterraines sédimentaires de charbon, de potasse, de bauxite ou de fer. Ces derniers peuvent représenter plusieurs dizaines de millions de mètres cubes, exploités sur plusieurs décennies.

6.6.3 Adaptation de l'architecture aux scénarios S1b, S1c, S2

L'architecture présentée ci-dessus peut être adaptée aux autres scénarios considérés dans l'étude (voir chapitre 3). La Figure 6.6.3 illustre l'adaptation de l'architecture pour les scénarios S1a, S1b et S2. On notera que les scénarios S1b et S1c conduisent à des plans d'architecture très voisins¹¹³.

¹¹² Un remblai composé de roche concassée et compactée a une densité moindre que la densité de la roche en place

¹¹³ En effet, si le nombre de colis C est moindre dans le scénario S1b, les colis considérés sont plus exothermiques et impliquent une densité de stockage moindre.

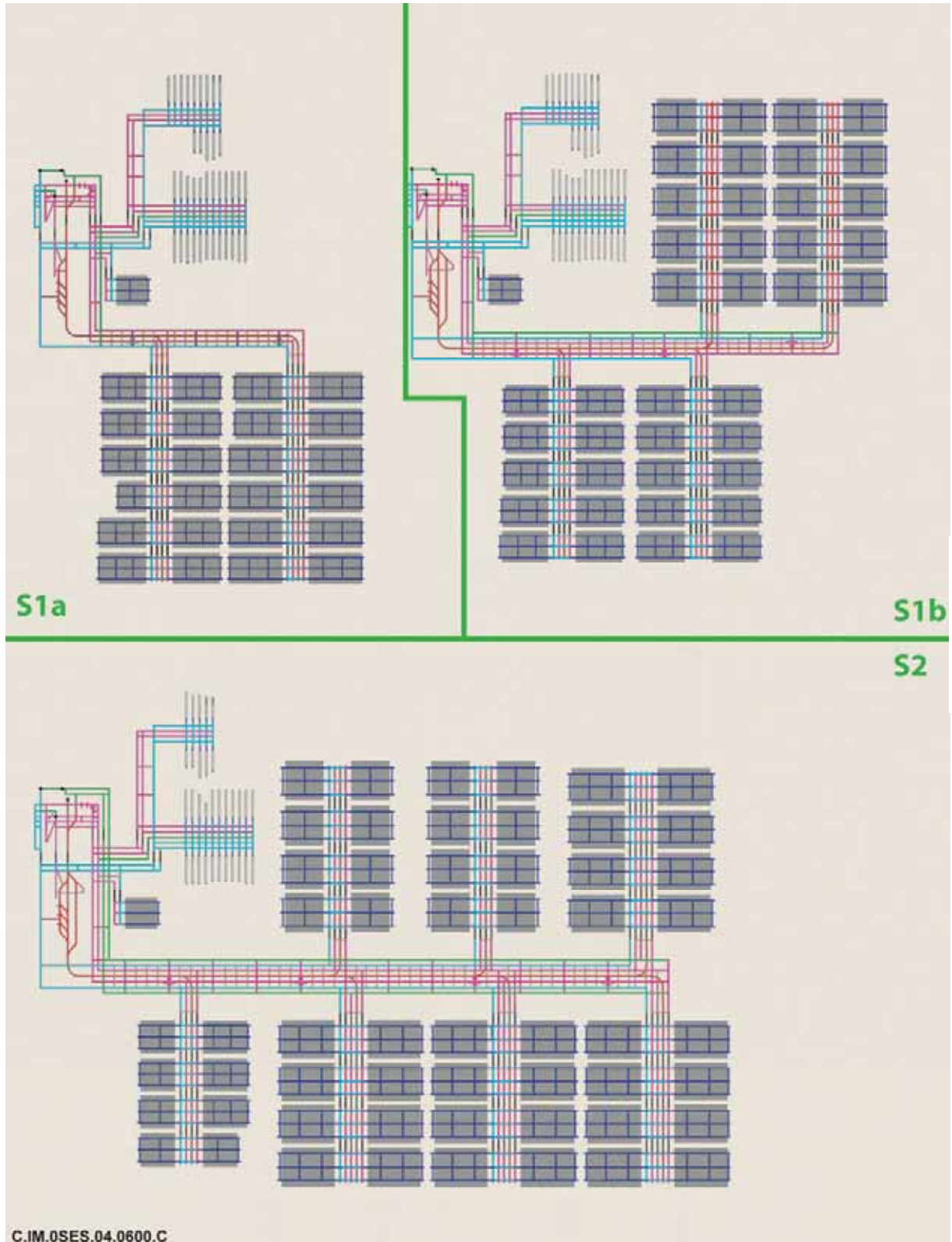


Figure 6.6.3 *Adaptation possible des architectures aux différents scénarios d'étude*

6.6.4 Flexibilité de l'architecture vis-à-vis de l'inventaire et de la gestion des déchets

- **Influence de la quantité de déchets**

Les architectures présentées peuvent s'adapter sans difficulté à des inventaires de déchets plus (ou moins) importants, le nombre de modules à créer pouvant facilement être ajusté sans remettre en cause l'organisation générale.

- **Influence des rythmes d'exploitation**

On rappelle que les chroniques d'exploitation retenues dans le cadre de l'étude ne sont à considérer que comme des hypothèses. Elles ne peuvent constituer des prévisions ou préfigurer une quelconque réalité industrielle. Elles permettent toutefois de constituer un cadre raisonnable et conventionnel pour apprécier la faisabilité.

Une variation du rythme d'exploitation du stockage ou l'exploitation simultanée de plusieurs zones de stockage de colis exothermiques auraient une influence minimale sur l'emprise générale, mais pourraient influencer sur le dimensionnement des galeries d'infrastructures : toutes choses égales par ailleurs, des cadences d'exploitation plus élevées se traduiraient par des cadences de travaux de construction plus élevées et pourraient donc nécessiter des infrastructures de plus grande capacité, c'est-à-dire un plus grand nombre de galeries ou des galeries de plus grand diamètre.

On pourrait également être amené à concevoir des architectures de formes différentes si l'on souhaitait mettre en stockage simultanément des colis de déchets C et de combustibles usés en dédoublant les infrastructures.

- **Prise en compte du stockage de combustibles usés CU3**

L'architecture peut être adaptée facilement pour prendre en compte le stockage de combustibles CU3, dans l'hypothèse où ils ne seraient pas retraités. La zone de stockage correspondante représenterait environ 5 ha (Figure 6.6.4).

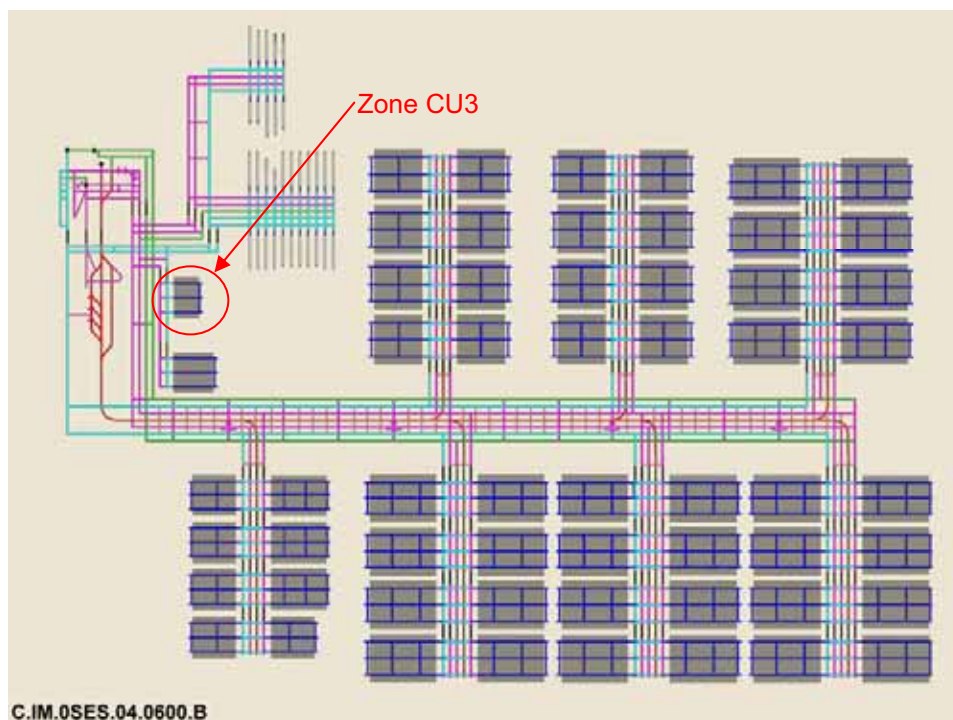


Figure 6.6.4

Adaptation de l'architecture aux combustibles usés CU3

6.6.5 Sensibilité de l'emprise du stockage à la durée d'entreposage préalable.

L'emprise des zones de stockage de déchets B et C0 ne dépend pas de la durée d'entreposage préalable. Pour les colis fortement exothermiques, l'emprise totale des zones de stockage résulte de celle des modules de stockage, sensible à la durée d'entreposage, et des distances séparant ces modules. La zone de stockage de déchets C pour le scénario S1a présente une emprise de 500 hectares environ pour une durée d'entreposage préalable de 60 ans (pour les colis types C1/C2) à 70 ans (pour les colis types C3/C4). Au-delà d'une certaine durée d'entreposage, la sensibilité de cette emprise s'atténue : elle devient 300 hectares pour une durée d'entreposage de 150 ans (Figure 6.6.5) et est diminuée de moitié pour une durée de 200 ans. Dans l'hypothèse d'un stockage avec combustibles usés (scénario S2), on observe également une sensibilité de l'emprise à la durée d'entreposage préalable (Figure 6.6.6). Cette sensibilité est variable suivant la vitesse de décroissance thermique des différents types de colis.

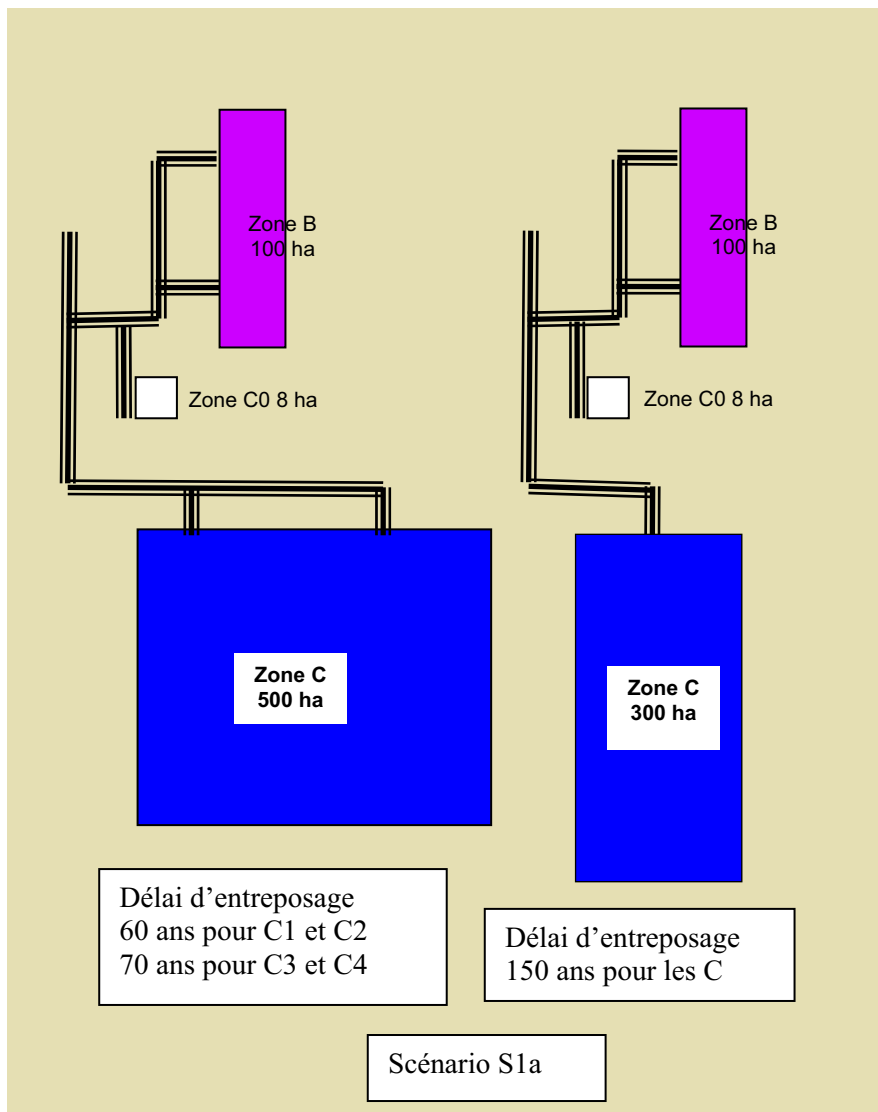


Figure 6.6.5

Sensibilité de l'emprise d'un stockage à la durée d'entreposage préalable des colis fortement exothermiques - scénario S1a

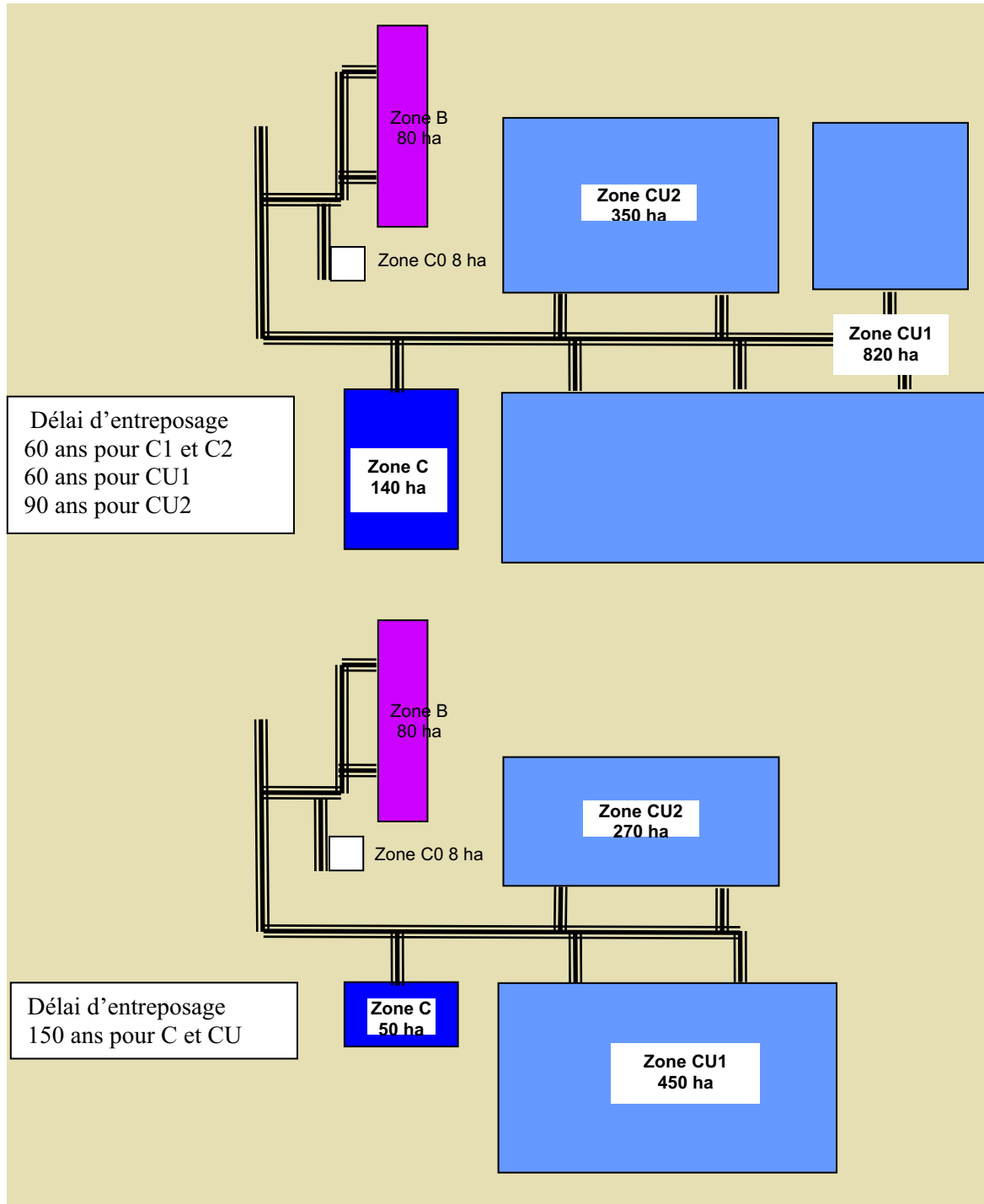


Figure 6.6.6

Sensibilité de l'emprise d'un stockage à la durée d'entreposage préalable des colis fortement exothermiques - scénario S2

7

Les puits et les galeries

7.1	Exposé des questions principales	294
7.2	Principes de conception retenus	295
7.3	Description des puits.....	296
7.4	Description des infrastructures de liaison	304
7.5	Construction des puits et des galeries de liaison	308
7.6	Durabilité des ouvrages	311
7.7	Fermeture des installations souterraines	312

Les ouvrages de liaison et d'accès aux modules de stockage sont constitués de puits et de galeries. L'objet du présent chapitre est de présenter la conception de ces ouvrages, leur dimensionnement, leur mode de construction, de gestion et de fermeture.

Ce chapitre rappelle tout d'abord les fonctions de ces ouvrages et les principes de conception retenus, au regard des besoins opérationnels et des objectifs de sûreté à long terme.

Il décrit ensuite les puits et les galeries. Il montre en particulier la logique qui sous-tend la détermination du nombre de puits. Il évoque également la possibilité d'avoir recours à une descendrière. En ce qui concerne les galeries, il expose les principes de leur dimensionnement.

Ce chapitre décrit ensuite le mode de construction des puits et des galeries. Il montre la constructibilité des ouvrages d'accès dans les argilites de la formation étudiée ainsi que lors de la traversée des formations géologiques sus-jacentes.

Il précise comment la réversibilité est prise en compte dans le dimensionnement et la maintenance des ouvrages.

Enfin, il fournit une description du mode de fermeture des ouvrages. Il expose les techniques de remblayage avec un matériau préparé à partir des déblais de creusement ainsi que leur scellement par des bouchons en argile gonflante de faible perméabilité. Il évoque également les essais de démonstration sur le remblayage et le scellement de galeries.

7.1 Exposé des questions principales

Les ouvrages de liaison et d'accès ont pour fonction de permettre le transfert des flux engendrés par les activités de construction, de mise en stockage des colis et de fermeture des installations souterraines. Leur conception est largement fondée sur les besoins opérationnels de ces activités. Elle intègre également les considérations liées à la réversibilité et à la sûreté à long terme [37].

7.1.1 Besoins opérationnels

Les ouvrages de liaison et d'accès aux alvéoles doivent permettre la construction, l'exploitation et la fermeture du stockage, suivant les principes définis au chapitre 6, à savoir construction progressive et séparation des flux. Le chapitre 6 a donné également les ordres de grandeur des flux engendrés par ces différentes activités et indiqué que le dimensionnement des galeries est dicté essentiellement par le gabarit des engins qui y circulent et par les besoins de ventilation.

Ces mêmes facteurs, ainsi que la masse des colis et de leurs hottes à transférer déterminent le dimensionnement des puits. A ce stade des études, la masse maximale de l'ensemble hotte plus colis est estimée à 100 tonnes environ (cas de certains colis B et, le cas échéant, de conteneurs de combustibles usés à quatre assemblages de type CU1).

7.1.2 Réversibilité et sûreté à long terme

Les ouvrages du stockage (puits et galeries) doivent pouvoir rester ouverts sur une durée a minima séculaire pour la réversibilité. Ils doivent pouvoir résister à la pression des terrains qui pourra s'exercer sur cette échelle de temps.

Mais ces ouvrages doivent aussi pouvoir être fermés si le choix en est fait. Leur fermeture peut alors s'effectuer par étapes successives, de façon à disposer de la flexibilité de gestion qui participe de la réversibilité.

Une fois fermés, les ouvrages doivent contribuer aux fonctions de sûreté suivantes : i) limiter sur le long terme les déformations mécaniques de l'argilite, ii) limiter la circulation d'eau et iii) fractionner le stockage.

La pression des terrains sur les ouvrages s'accroît progressivement dans le temps avec le fluage et la relaxation de l'argilite. Parallèlement, on doit prendre en compte une décroissance de la résistance

mécanique des revêtements avec les altérations chimiques. Ces deux phénomènes sont de nature à conduire, longtemps après la fermeture, à une rupture des revêtements. Il s'ensuit une reprise de déformations dans l'argilite, qui pourrait faire apparaître ou réactiver des zones endommagées (fracturée et microfissurée) autour des ouvrages.

Pour limiter ces déformations, l'Andra a prévu lors de la fermeture un remblayage systématique des galeries.

En matière de limitation de la circulation d'eau, le chapitre 6 montre comment celle-ci repose en premier lieu sur les caractéristiques de l'argilite. La mise en place de scellements dans les puits et galeries permet, à long terme, de diminuer encore le débit d'eau percolant dans le stockage et la vitesse de circulation de cette eau.

Les scellements des galeries visent aussi à fractionner le stockage. Le principe du fractionnement consiste à circonscrire une situation altérée à une fraction du stockage. Le fractionnement doit limiter autant que possible les effets d'une telle situation sur les modules voisins de celui directement impliqué.

7.2 Principes de conception retenus

L'accès aux alvéoles de stockage est réalisé par deux types d'ouvrages :

- les ouvrages de liaison entre les installations de surface et les installations souterraines (puits, descenderies) ;
- les galeries souterraines de liaison et d'accès.

7.2.1 Puits ou descenderie

Pour accéder aux installations souterraines du stockage, deux types d'ouvrages sont envisageables, les puits et les descenderies :

- les puits sont des ouvrages verticaux. Ils sont généralement équipés d'une machinerie permettant de descendre et de monter des charges par l'intermédiaire de cages suspendues à des câbles d'acier ;
- les descenderies sont des galeries inclinées, généralement de pente inférieure à 15 % ; elles peuvent être empruntées par des véhicules sur pneumatiques¹¹⁴.

Ces deux types d'ouvrage sont actuellement employés très couramment dans l'industrie minière, les puits depuis plus d'un siècle, et les descenderies depuis plusieurs décennies.

La solution de référence choisie pour le stockage souterrain recourt seulement à des puits. Cette solution a l'avantage de la simplicité (un seul type d'ouvrage) ; les puits peuvent être adaptés à des flux à transporter importants.

La possibilité d'utiliser une solution mixte puits – descenderie sera discutée plus loin à la section 7.3.4.

Parmi les stockages souterrains existants ou en projet, le WIPP (Etats-Unis) et le projet Gorleben (Allemagne) recourent uniquement à des puits ; ils sont creusés, à des profondeurs respectives de 650 et 900 m, dans des terrains sédimentaires jusqu'à la formation de sel hôte. En Suède et en Finlande, des solutions mixtes combinant puits et descenderie sont envisagées à des profondeurs d'environ 500 m dans le granite.

¹¹⁴ Il existe également des puits inclinés dont la pente est comprise entre 20 % et la verticale. Ce type d'ouvrage n'est utilisé que dans des conditions particulières (gisements inclinés, topographie montagneuse, etc.).

7.2.2 Nombre et affectations des puits

Au stade actuel des études, on prévoit un ensemble de quatre puits pour gérer l'ensemble des flux à transférer :

- un puits exclusivement réservé au *transfert des colis* ;
- un puits exclusivement réservé au *retour d'air*, pour assurer l'ensemble des retours d'air et des désenfumages ;
- un puits de *personnel* et un puits de *travaux* pour assurer l'ensemble des autres flux, y compris l'alimentation en air frais.

● Discussion et comparaison avec le WIPP

L'ensemble de quatre puits ainsi défini permet de s'adapter aux différents scénarios décrits au chapitre 3, avec une grande souplesse et en limitant les interférences entre flux.

Cet ensemble peut se comparer au WIPP (voir chapitre 6), qui pour une profondeur comparable (650 m au lieu de 500 m), mais pour des flux moins importants (volume d'excavation annuel de quelques dizaines de milliers de mètres cubes, pas de béton, colis moins encombrants) comporte également quatre puits :

- un puits de *colis* ;
- un puits de *travaux* pour l'extraction des déblais, les matériels et le personnel ;
- un puits réservé à l'entrée d'air (+ auxiliaire personnel) ;
- un puits réservé au retour d'air.

7.2.3 Principes de conception des galeries de liaison et d'accès

Ces principes ont été définis au chapitre 6 :

- hiérarchisation des galeries en galeries de liaison principales communes à plusieurs zones, galeries de liaison secondaires propres à chaque zone, et galeries d'accès propres à chaque module ;
- spécialisation des galeries par fonction (travaux avec voie ferrée ou piste pour engins sur pneumatiques, exploitation, retour d'air).

Par ailleurs, on rappelle que la conception présentée au stade actuel permet de minimiser le diamètre des galeries.

7.3 Description des puits

7.3.1 Puits de transfert des colis

Ce puits est exclusivement affecté au transfert des colis dans leurs hottes de protection (et à celui des hottes vides). Deux raisons motivent cette affectation exclusive : i) le caractère particulier des transferts (charge élevée, dispositions spécifiques de prévention et de protection vis-à-vis du risque de chute de colis en puits), ii) le nombre de colis à transférer, qui peut être proche de la capacité maximale d'un puits.

Le diamètre utile du puits est de 11,50 m. Ce diamètre est entièrement déterminé par les équipements : ceux nécessaires au transfert des colis de stockage entre la surface et le fond ainsi que les équipements auxiliaires (cage de secours pour le personnel d'entretien et de visite).

Le soutènement du puits est adapté aux différents terrains rencontrés :

- près de la surface, une paroi moulée de 60 cm d'épaisseur peut être nécessaire pour traverser des terrains potentiellement aquifères (les calcaires du Barrois, dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de mètres) ;

- au-dessus du Callovo-Oxfordien, le soutènement est constitué de boulons de longueur 3 m et de béton projeté ; l'épaisseur de béton varie de 20 à 30 cm, suivant les terrains et la profondeur ;
- dans le Callovo-Oxfordien, deux types de soutènement sont envisagés. Dans la zone du futur scellement de puits (voir plus loin section 7.7.3), il s'agit de cintres et béton projeté ; cette zone occupe une hauteur d'une cinquantaine de mètres à partir du toit de la formation. En dehors de la zone de scellement, le soutènement est constitué de boulons de longueur 4 m et béton projeté.

Au stade actuel des études, l'épaisseur du revêtement en béton est de 45 à 50 cm dans les terrains situés au-dessus du Callovo-Oxfordien ; elle est de 1,35 m dans le Callovo-Oxfordien, hors renforcement local au niveau de la recette du puits.

Le dimensionnement du soutènement et du revêtement du puits a été effectué par des méthodes analytiques classiques en géotechnique (méthode « convergence confinement¹¹⁵ », associée à un « calcul à barre¹¹⁶ » pour tenir compte de l'anisotropie des contraintes horizontales). Le paramètre dimensionnant est la pression exercée par les terrains encaissants, en particulier celle exercée par l'argilite, du fait de son fluage. Les études montrent que les phénomènes de dégradation chimique des revêtements n'interviennent que pour des durées très sensiblement plus longues. Cela assure à l'ouvrage une durée de vie pluriséculaire.

Le soutènement et le revêtement des autres puits sont similaires et adaptés en fonction des diamètres respectifs des puits.

La garde entre le fond du puits et le mur de la formation du Callovo-Oxfordien est d'une trentaine de mètres, dans l'hypothèse d'une formation de 130 mètres d'épaisseur.

¹¹⁵ La méthode convergence confinement utilise les courbes effort – déformation du revêtement (ou du soutènement) et du terrain. L'équilibre du système revêtement – terrain est trouvé à l'intersection de ces deux courbes.

¹¹⁶ Dans le calcul à barre, le revêtement est schématisé par un ensemble de barres et l'action du terrain est schématisée par des ressorts. Ce calcul permet, en combinaison avec la méthode convergence – confinement, de traiter les cas de contraintes anisotropes.

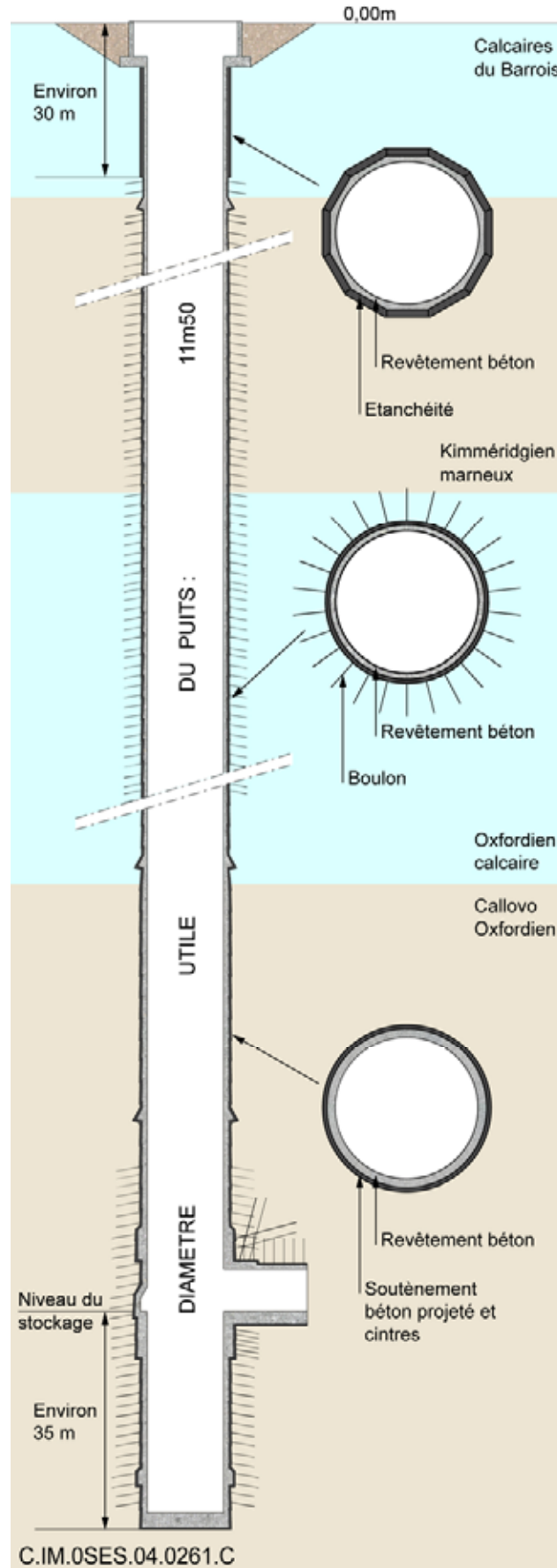


Figure 7.3.1

Section longitudinale du puits de transfert des colis

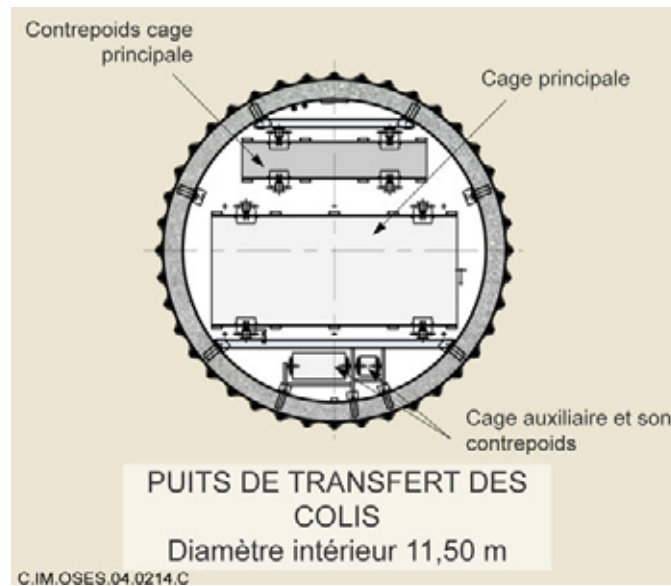


Figure 7.3.2 Section du puits de transfert des colis

L'équipement du puits est détaillé au chapitre 9. La machinerie du puits peut transporter une charge utile de 110 tonnes, à une vitesse de 1 m/s. Le poids de la cage est équilibré par un contrepoids. La cage est guidée par des systèmes de guidage en profilés métalliques. Une petite cage de secours indépendante permet d'assurer la sécurité du personnel affecté aux opérations de maintenance.

7.3.2 Puits de retour d'air

Le puits de retour d'air a pour fonctions d'assurer le retour d'air général du stockage (travaux et exploitation), l'évacuation des fumées en cas d'incendie et, le cas échéant, le retour d'air susceptible d'être contaminé en cas d'accident (air en provenance du puits de descente des colis).

Le besoin d'un puits réservé au retour d'air résulte des débits d'air très importants mis en jeu (plusieurs centaines de mètres cubes par seconde) et par le souci d'éviter de placer des équipements importants dans un air vicié (fumées de diesel, poussière, autres fumées éventuelles), au détriment de leur tenue dans le temps.

Le diamètre du puits est déterminé par les besoins de ventilation. Le diamètre utile est de 10 m. Il permettrait une éventuelle augmentation de la capacité de ventilation et limite les dépenses énergétiques liées à la ventilation. L'ouvrage est divisé en 3 compartiments, un pour chaque retour d'air. Il est uniquement équipé de matériel permettant les visites et l'entretien.

7.3.3 Puits de personnel et puits de travaux

Cet ensemble de deux puits assure le transfert des autres flux nécessaires à la construction, à l'exploitation et à la fermeture du stockage. Ces puits servent également d'entrée d'air pour l'ensemble des installations souterraines à l'exception du puits de descente des colis.

Dans l'architecture présentée, un puits est exclusivement réservé au transport du personnel et du petit matériel. L'autre puits, le puits de travaux, permet d'assurer l'extraction des déblais, la descente des remblais en vrac, la descente de béton préparé au jour, le transfert de gros matériel, de pièces et de matériaux de construction.

Le puits de travaux peut également servir d'issue de secours en cas d'indisponibilité du puits de personnel.

Les équipements de ces puits sont des matériels classiques tels que ceux utilisés dans l'industrie minière. Des câbles et des tuyauteries permettent également de passer les réseaux dans ces puits.

7.3.3.1 Puits de personnel

Le puits de personnel a un diamètre utile de 6,50 m. Son dimensionnement est conditionné essentiellement par la dimension de l'équipement et les besoins de ventilation.

Son équipement se compose d'une cage principale permettant de transporter plusieurs dizaines de personnes simultanément. Une cage secondaire permet de secourir le cas échéant le personnel situé dans la cage principale.

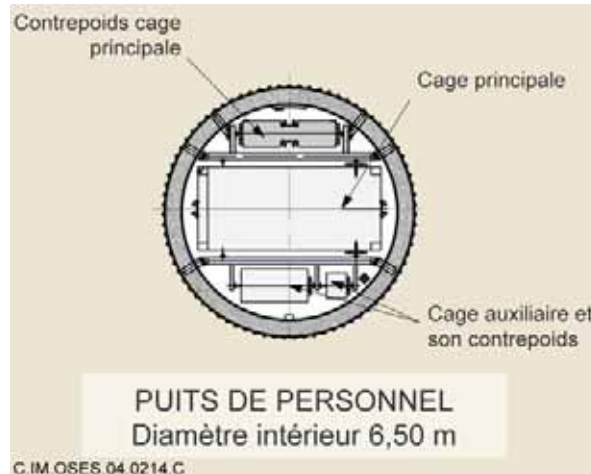


Figure 7.3.3 Section du puits de personnel

7.3.3.2 Puits de travaux

Il a un diamètre de 11,50 m, identique à celui du puits de colis.

Le puits est divisé en deux compartiments :

- un compartiment équipé de deux skips (trémies mobiles permettant de transporter des matériaux en vrac) assure la remontée des déblais et la descente des remblais¹¹⁷ ;
- un compartiment équipé d'une grande cage permettant la montée et la descente d'engins et de gros équipements. La capacité de la cage est de 40 tonnes utiles. Elle est conçue pour servir à l'évacuation du personnel présent dans les installations souterraines en cas d'indisponibilité du puits de personnel.

Dans chaque compartiment, une cage de secours permet de secourir le personnel présent dans le puits.

Suivant leurs caractéristiques, les bétons peuvent être descendus par tuyauteries ou par trémies malaxieuses empruntant la cage.

¹¹⁷ Suivant la conception du puits, ces deux opérations peuvent être réalisées simultanément

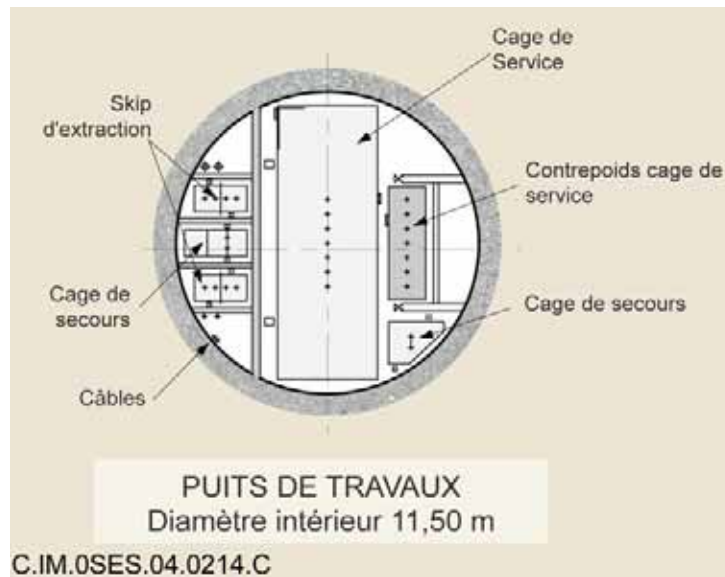


Figure 7.3.4 Section du puits de travaux

7.3.4 Intérêt d'une descenderie

Une descenderie est une galerie inclinée, d'une pente généralement inférieure à 15 %, permettant d'accéder à des installations souterraines. Ce type d'ouvrage s'est répandu dans l'industrie minière dans la seconde moitié du siècle dernier, avec le développement des engins miniers diesel et des convoyeurs à bande. La comparaison entre puits et descenderie fait l'objet d'un débat permanent au sein de l'industrie minière. Un grand nombre de mines sont équipées des deux types d'ouvrages.

La descenderie est plus souple d'exploitation qu'un puits car elle peut être empruntée sans rupture de charge par une grande variété de véhicules. Elle ne dépend pas, comme un puits, d'un équipement unique certes très fiable, mais à l'entretien contraignant. Les flux possibles sont cependant plus limités que dans un puits et l'expérience montre que les risques d'incidents sont plus élevés.

Parmi les facteurs qui conduiraient par analogie avec l'industrie minière à préférer un accès par descenderie, on note que :

- les terrains de recouvrement sont peu aquifères et de caractéristiques mécaniques généralement bonnes ;
- les flux de colis sont limités en nombre de mouvements et sont constitués de charges encombrantes et lourdes ;
- les flux de matériaux engendrés par les travaux restent faibles tant que les travaux se cantonnent aux zones accueillant les colis B et C0.

En revanche, la profondeur de 500 m est plutôt élevée pour une descenderie, mais pas sans précédent. La géométrie de la couche et la topographie sont simples, ce qui tendrait à faire préférer la solution puits.

Mise à part la fonction de retour d'air, où la descenderie n'a ici aucun intérêt, la liste de facteurs ci-dessus ne permet pas une comparaison très tranchée entre les deux types d'accès. Une descenderie peut être utilisée soit pour la descente des colis, soit pour les fonctions de travaux. À ce stade des études, l'utilisation de descenderies n'est considérée qu'à titre de variante.

Les paragraphes ci-dessous montrent deux exemples de descenderies possibles. Le premier exemple est une descenderie orientée « descenderie de travaux », conçue pour faciliter la circulation des engins. Elle est très semblable à une descenderie de type minier. Le deuxième exemple est une descenderie orientée « transfert de colis », qui est conçue pour limiter la vitesse d'impact en cas de perte de contrôle du véhicule transportant les colis.

7.3.4.1 Descenderie de travaux

Ce type de descenderie peut être envisagé en remplacement du puits de service pour la construction et l'exploitation des zones B et C0.

La descenderie se compose, dans l'exemple présenté, de 8 tronçons droits de longueur 340 m et pentés à 15 % ; ceux-ci sont reliés entre eux par des tronçons en demi-cercle pentés à 10 % avec un rayon de 30 m. Le diamètre utile de la descenderie est d'environ 6 à 8 m. Les tronçons droits sont orientés (à la pente près) selon la contrainte horizontale majeure, de façon à assurer les meilleures conditions possibles pour les scellements futurs de la descenderie.

Une cheminée¹¹⁸ permet de faciliter la ventilation et le désenfumage de l'ouvrage pendant sa construction et son utilisation. Des garages permettent le croisement des engins.

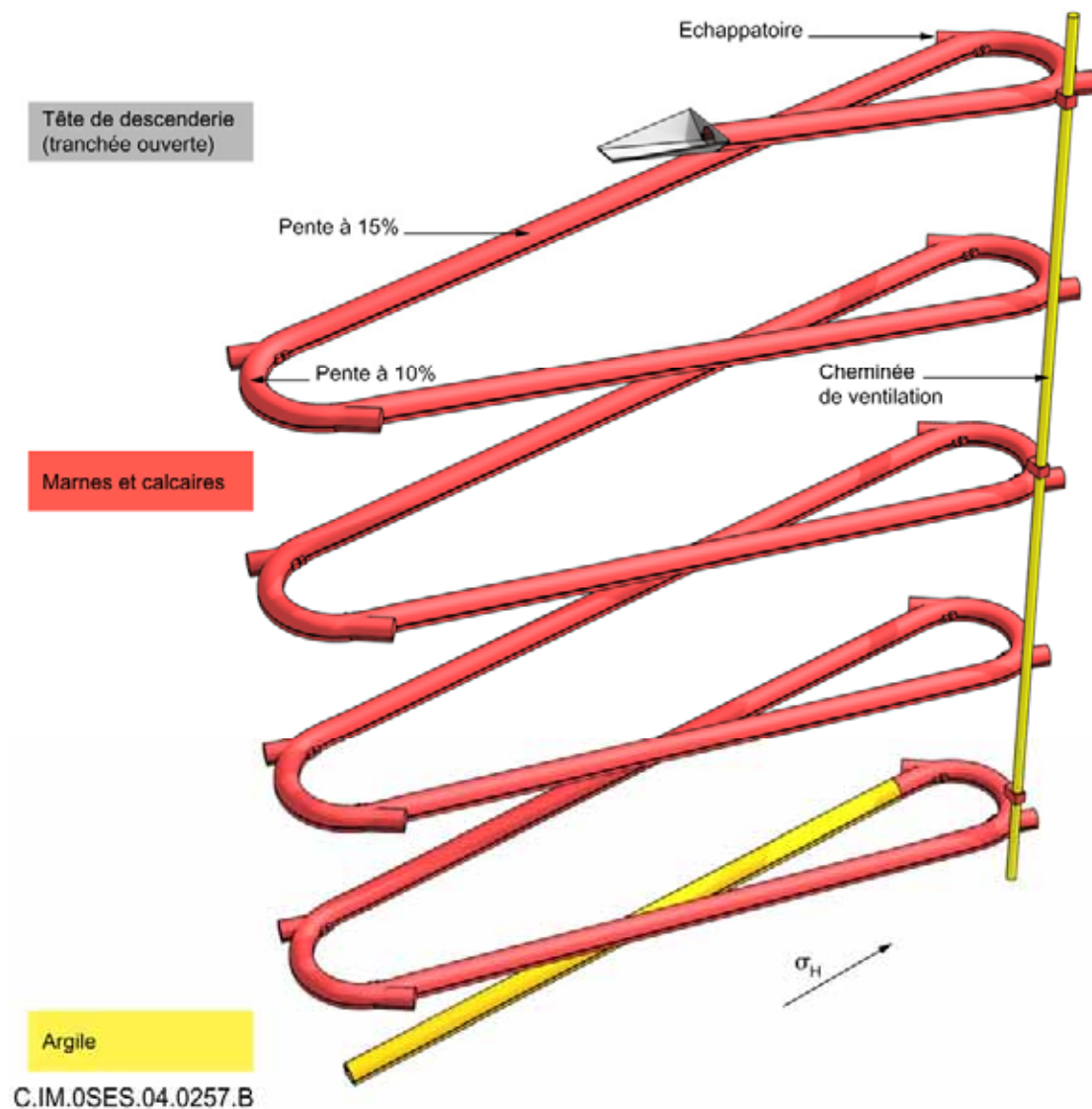


Figure 7.3.5 Descenderie de travaux

¹¹⁸ Pour mémoire, cette cheminée serait scellée lors de la fermeture du stockage de façon analogue à un puits.

7.3.4.2 Descenderie pour le transfert des colis

La descente des colis et la remontée des hottes sont assurées au moyen d'une descenderie par des engins électriques d'un type voisin de celui utilisé pour le transfert horizontal des colis dans le stockage (voir chapitre 9). Un tel ouvrage permettrait d'éliminer les risques de chute sur une grande hauteur. Dans l'exemple présenté, c'est une galerie pentée à 10 %. Sa forme générale est hélicoïdale. Chaque spire a une forme carrée et est composée de tronçons droits de 80 m de long et de courbes de rayon intérieur d'environ 10 m. La longueur des tronçons a été limitée dans cet exemple afin de réduire la vitesse potentielle (50 km/h au plus) d'un véhicule de transfert des colis dont le système de freinage serait défaillant. À chaque virage, un échappatoire permettrait d'arrêter le véhicule en cas de dérive éventuelle. Le diamètre utile de la galerie est d'environ 7 m. Une cheminée verticale de diamètre 3 m relie entre elle les différentes spires et permet d'assurer un circuit d'air spécifique à la descenderie, indépendant de la ventilation du stockage.

À la fermeture, l'ensemble est également scellé selon des dispositions analogues à la descenderie de travaux.

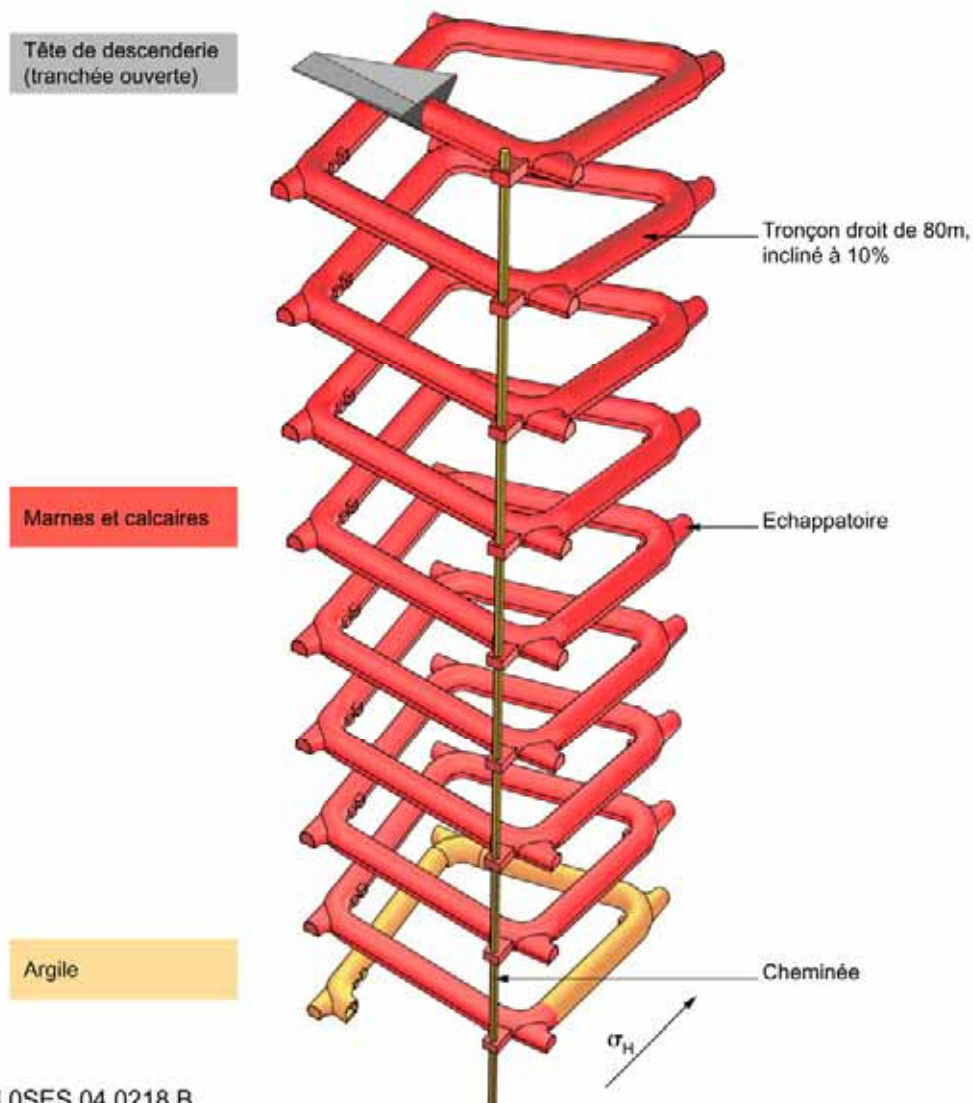


Figure 7.3.6 Descenderie pour le transfert des colis

7.4 Description des infrastructures de liaison

Ces infrastructures comportent d'une part les infrastructures de la zone des puits, décrites à la section 7.4.1, et d'autre part les galeries de liaison, décrites à la section 7.4.2, et qui connectent cette zone aux galeries d'accès aux alvéoles.

7.4.1 Les infrastructures de la zone des puits

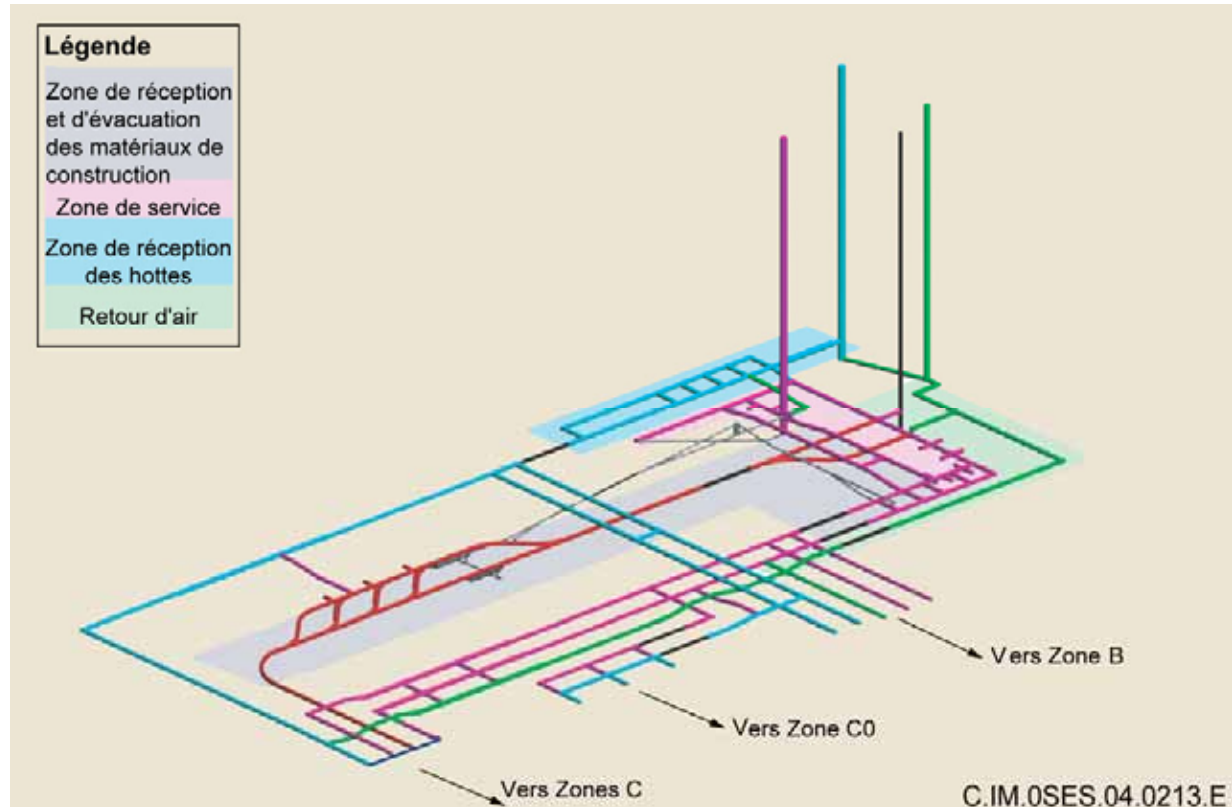


Figure 7.4.1 Zone des puits

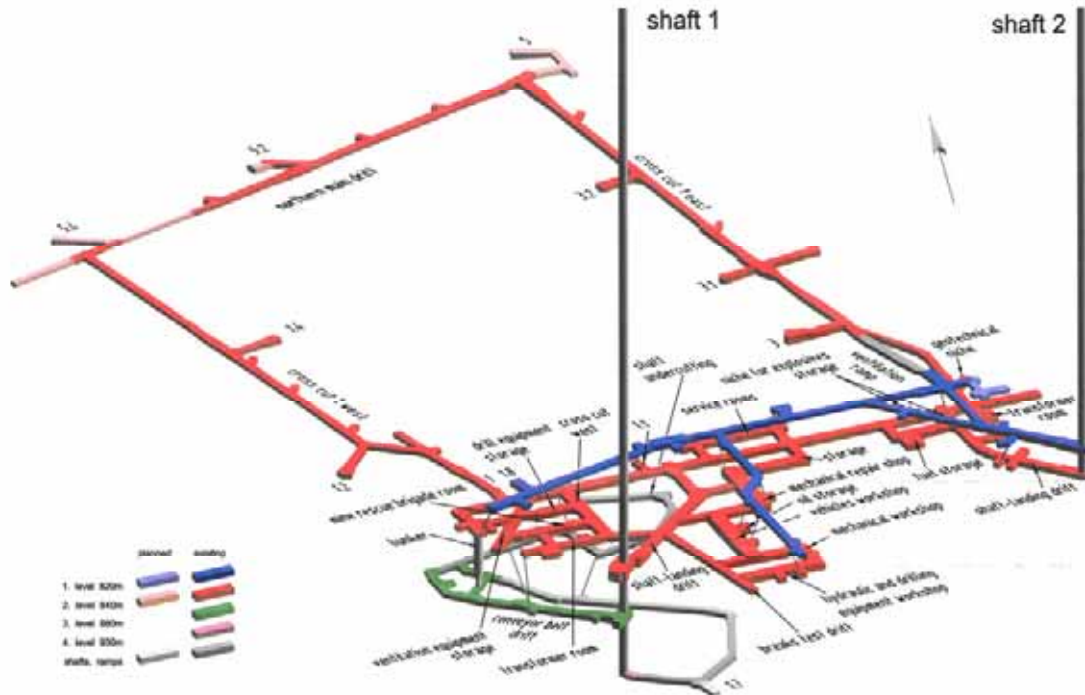
Les infrastructures de la zone des puits constituent l'interface entre les puits et les galeries de liaison aux zones de stockage. Elles sont organisées autour des quatre fonctionnalités suivantes :

- 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 ;
- le retour d'air.

Du fait de la diversité des fonctions à satisfaire et des flux à gérer, la zone des puits est une zone complexe, dont la conception doit être approfondie. On décrit ici une conception préliminaire possible pouvant être adaptée et optimisée selon les scénarios d'étude. Cette conception s'apparente à celle d'une mine souterraine, rendue néanmoins plus complexe par la présence des colis de déchets et des flux importants de béton.

La Figure 7.4.2 montre, à titre d'exemple, la zone des puits du projet de stockage de Gorleben en Allemagne.

■ Gorleben: Exploratory Area 1



DBE Technology GmbH

Figure 7.4.2 Zone des puits de Gorleben

7.4.2 Les galeries de liaison

L'organisation générale des galeries de liaison et des exemples de dispositions de galeries ont été présentés au chapitre 6. La présente section se limite à la description des galeries prises individuellement. Pour mémoire, les galeries d'accès aux alvéoles sont décrites au chapitre 5.

7.4.2.1 Géométrie des galeries de liaison, soutènement et revêtement

À ce stade des études, le diamètre des galeries a été volontairement limité à une section aussi faible que possible, compte tenu des flux traversant ces galeries. À quelques exceptions près, le diamètre utile des galeries de liaison est de 5,7 mètres. La section est en fer à cheval. La forme des galeries est ajustée suivant la direction de la galerie par rapport à la contrainte horizontale.

Le soutènement des galeries est composé de boulons de longueur 3 m et de béton projeté d'épaisseur 20 cm.

À l'image des tunnels de génie civil, le revêtement est dimensionné pour assurer aux galeries une durée de vie d'ordre séculaire.

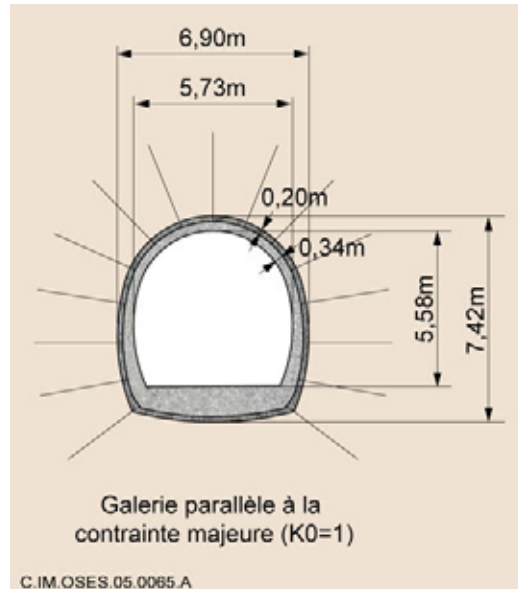


Figure 7.4.3 Sections standard de galerie de diamètre utile moyen 5.7 m

À l'intersection de galeries de mêmes dimensions, des dispositions constructives spécifiques doivent être prises en compte pour assurer la stabilité mécanique. Dans la solution proposée à ce stade des études, le diamètre de l'une des galeries est augmenté de façon à ce que le rapport des hauteurs utiles soit environ 1,3 pour donner une forme plus favorable à la tenue des carrefours (l'intersection de deux galeries de même diamètre engendrerait des « voûtes plates »)¹¹⁹. Des piliers de renfort en béton armé, d'une section d'environ 5 m², peuvent aussi être constitués aux quatre coins du carrefour.

Des dispositions particulières peuvent être envisagées pour les tronçons de galeries appelés à recevoir un scellement à la fermeture du stockage. Elles visent à minimiser l'endommagement ou l'extension de la zone endommagée, afin de favoriser l'efficacité du scellement. Pour éviter les effets potentiellement dommageables des boulons sur l'intégrité de l'argilite, l'emploi de boulons est évité et remplacé par un soutènement par cintres métalliques et béton projeté de 30 cm d'épaisseur. La forme de la galerie peut être rapprochée d'une forme circulaire, en réduisant localement le diamètre utile (5,2 mètres).

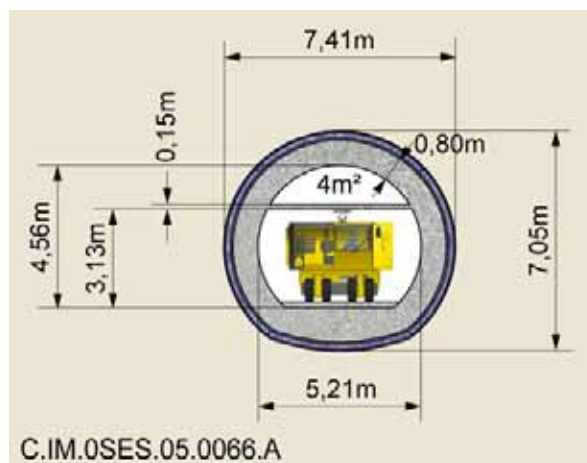


Figure 7.4.4 Section de galerie envisageable en zone de scellement

¹¹⁹ Cette disposition facilite également le virage des engins les plus encombrants (engins de transfert des colis B et CU).

7.4.2.2 Fonctions et équipement des galeries de liaison

Cette section illustre des exemples des différents types de galeries de liaison évoqués au chapitre 6.

- **Les galeries de transfert des colis**

La fonction principale de ces galeries est le transfert des colis entre le puits des colis et les galeries d'accès aux alvéoles.

En outre, ces galeries assurent pour toutes les zones l'amenée d'air frais dans les modules en exploitation (voir chapitre 6).

On notera que ces galeries ne sont pas dimensionnées pour permettre le croisement d'un engin de transfert des colis avec un piéton ou un autre véhicule. Cela est envisageable du fait d'un trafic faible (une dizaine de trajets par jour), de faibles vitesses de circulation des engins de transfert des colis (5 à 10 km/h) et d'une circulation de personnel dans ces galeries strictement limitée. L'accès des engins ou personnels d'intervention peut se faire à partir des galeries de travaux, par les recoupes joignant entre elles les différentes galeries du faisceau.

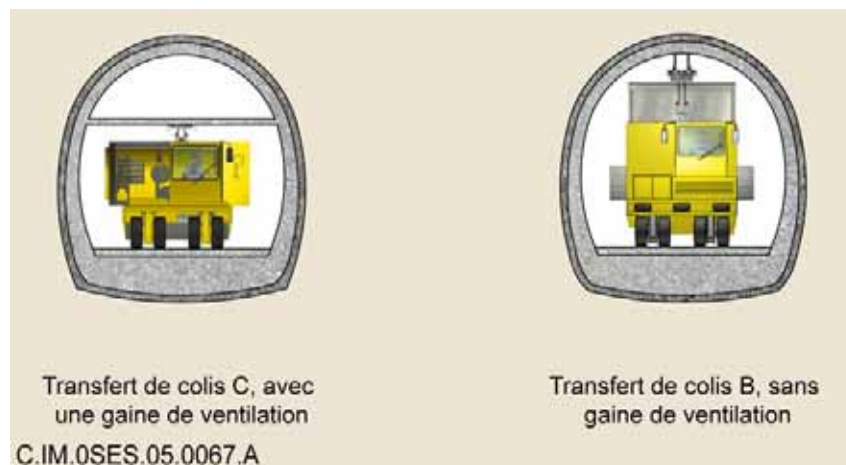


Figure 7.4.5 Galeries de transfert des colis C et B

- **Les galeries de travaux pour engins sur piste**

La fonction principale de ces galeries est de permettre la circulation des engins de travaux et transports annexes (tels que personnels, soutènement, revêtement, véhicules de secours). Pour les zones B et C0 les transports de déblais, de béton et de remblai se font par camions et utilisent ces galeries.

En outre, ces galeries permettent le passage de réseaux et l'amenée d'air frais dans les zones de travaux.

Ces galeries sont équipées d'une piste en béton ou en enrobé pour la circulation des engins sur pneus. Un trottoir permet la circulation de personnel à pied. Ce trottoir est franchissable pour permettre le dépassement des engins par les véhicules de secours, mais la largeur des galeries est insuffisante pour une circulation à double sens.

Dans les galeries parcourues par des engins sans caténaires (engins électriques de faible puissance et engins diesel de faible ou forte puissance), il est possible d'installer une gaine de retour d'air/désenfumage de grande section (8 à 9 m²).

Les galeries parcourues par des camions électriques de grande puissance sont équipées de caténaires. Le gabarit de ce système de caténaires, qui doit permettre un débattement transversal des camions pour

croiser d'autres engins tels que les véhicules de secours, ne permet pas la mise en place de gaines de ventilation de grande section¹²⁰.



Figure 7.4.6 Galerie de travaux avec piste

- **Les galeries de travaux équipées de voies ferrées**

La fonction principale de ces galeries est d'assurer le transport des déblais de creusement, du béton et des remblais entre le puits et les unités d'exploitation en travaux, pour la zone de stockage des déchets C et, le cas échéant, les zones de stockage de combustibles usés.

Elles sont équipées de deux voies ferrées à écartement métrique, connectées par des traversées – jonctions, de caténaires, de gaines de ventilation de grande section (environ 7 m²) et de passages de réseaux.

- **Les galeries de retour d'air**

La fonction principale de ces galeries est d'assurer en conditions normales le retour d'air en provenance des chantiers de creusement et d'exploitation vers le puits de retour d'air. Suivant les besoins, elles peuvent également être équipées de gaines pour le désenfumage.

Ces galeries n'ont pas d'équipements autres que ceux nécessités par les besoins de ventilation ou de désenfumage. La présence de personnel dans ces galeries est strictement limitée aux besoins de maintenance et suppose la suspension des opérations de construction ou d'exploitation en amont aéraire.

7.5 Construction des puits et des galeries de liaison

7.5.1 Construction des puits

Cette section passe brièvement en revue les différentes techniques de creusement des puits, puis décrit la méthode privilégiée, en indiquant le cas échéant les variantes possibles de cette méthode.

7.5.1.1 Les méthodes de construction des puits

Pour la réalisation de puits de grand diamètre, la méthode traditionnelle consiste à foncer le puits à partir de la surface en abattant la roche à l'explosif ou à la machine à attaque ponctuelle, et à mettre en place au fur et à mesure du fonçage le soutènement et le revêtement du puits. Cette méthode est bien adaptée aux diamètres envisagés, compris entre 6,50 m et 11,50 m utiles.

¹²⁰ A l'inverse, les systèmes d'alimentation électrique des engins de transfert des colis et des chemins de fer ne nécessitent que peu ou pas de débatement transversal, et sont beaucoup moins encombrants.

Des méthodes de creusement totalement mécanisées ont été développées dans l'industrie minière. La méthode du « shaft drilling » consiste à forer le puits avec une sorte de tunnelier vertical équipé de molettes. Dans la méthode du « raise-boring », on commence par forer depuis la surface un « trou pilote » d'environ 30 cm de diamètre, jusqu'à une galerie préexistante. Depuis la galerie, on remonte un outil aléteur jusqu'au jour. Ces technologies présentent l'avantage de ne pas nécessiter de personnel dans le puits lors du creusement, mais l'inconvénient de ne pas permettre le soutènement et le revêtement du puits au fur et à mesure du creusement. Par ailleurs, dans l'état actuel de la technologie, ces méthodes ne sont pas applicables aux diamètres considérés.

7.5.1.2 Les principales phases de la construction d'un puits par méthode traditionnelle

Pour construire un puits, on commence par créer un avant puits de quelques dizaines de mètres de profondeur, puis on installe le matériel de fonçage du puits. On procède alors au fonçage proprement dit. Après le fonçage, on procède à l'équipement du puits et à l'installation de la machinerie définitive.

● **L'avant puits**

Le détail de la construction de l'avant puits pourra varier suivant la localisation exacte des puits et les caractéristiques des terrains près de la surface. Suivant la consistance des terrains de surface, les premiers mètres peuvent être creusés à la pelle mécanique. L'avant puits est creusé sur quelques dizaines de mètres en faisant se succéder les phases de creusement par foration et tir et de soutènement par boulons et grillage (et béton projeté si nécessaire). Dès que l'on n'a plus de risque de l'endommager par les tirs, on coule un radier en béton armé pour servir de base à la construction du puits.

● **Le matériel de fonçage du puits**

Le matériel de fonçage du puits se décompose classiquement en deux sous-ensembles : d'une part, le matériel mobile circulant dans le puits, d'autre part, le matériel fixe situé au jour.

Le matériel mobile est constitué d'un coffrage mobile et d'une plateforme à partir desquels sont effectués les travaux dans le puits. Le coffrage et la plateforme sont suspendus à des câbles et descendus au fur et à mesure de l'avancement des chantiers.



Figure 7.5.1 Plateforme de fonçage de puits (mine de sel de Konradsberg – Heilbronn – Allemagne)

Le matériel fixe est constitué d'un chevalement et d'un ensemble de treuils permettant les mouvements du matériel mobile. Ce matériel fixe, installé pour la construction du puits, sera remplacé en tout ou partie par un équipement définitif à la fin de la construction du puits.

● Le fonçage du puits

La plus grande partie du fonçage du puits est effectué en utilisant la plateforme. Cette plateforme est utilisée d'une part pour les opérations de creusement – soutènement, et d'autre part pour les opérations de mise en place du revêtement.

La foration de trous de mine est effectuée à l'aide de jumbos de foration supportés par la plateforme de travail.

Après le chargement des trous de mines à l'explosif, on tire une volée correspondant à un approfondissement d'environ 2 à 3 m suivant le diamètre du puits.

Après l'évacuation des fumées de tir grâce à une ventilation forcée, on procède à l'évacuation des déblais. Un grappin charge un cuffat¹²¹, qui est remonté au jour par un treuil.

Un soutènement (boulons ou cintres) est mis en place au fur et à mesure de la diminution du tas de déblais.

Le revêtement en béton est ensuite coulé par plots, à partir de la plateforme de travail, le béton étant descendu dans le puits par des tuyauteries spécialement équipées.

¹²¹ Benne de forme cylindrique spécifiquement conçue pour le fonçage des puits

● Équipement définitif du puits

Le montage des équipements définitifs du puits comprend dans un premier temps le montage des installations fixes situées à l'intérieur du puits : équipement du puisard et de la recette fond, installation des supports des rails de guidage des cages et des rails eux-mêmes, et, le cas échéant, construction de cloisons entre les différents compartiments du puits. Ce montage est en général réalisé en utilisant le matériel ayant servi au fonçage des puits.

Dans un deuxième temps, on monte le chevalement, les machines d'extraction et les équipements électriques. Enfin, on installe les câbles et les cages du puits.

7.5.2 Construction des galeries

Les techniques de construction de galeries sont analogues à celles utilisées pour la construction des alvéoles de stockage de déchets B et décrites à la section 5.1. Cependant, les sections de galeries de liaison étant plus faibles, les galeries peuvent être creusées en pleine section, et non pas en section divisée.

7.5.2.1 Galeries courantes

Les galeries de liaison et les galeries d'accès des modules de déchets C (et de combustibles usés) sont construites en quatre phases, par tronçons de plusieurs centaines de mètres :

- creusement par machine à attaque ponctuelle¹²² et soutènement par boulons et béton projeté de la galerie (cintres et béton projeté dans les zones de scellement) ;
- coulage du radier en béton ;
- coulage du revêtement en béton ;
- équipement de la galerie (réseaux, rails ou piste, gaine de ventilation, etc.).

7.5.2.2 Carrefours

Les carrefours de galeries sont construits en plusieurs temps :

- creusement et soutènement de la galerie de grand diamètre ;
- creusement de saignées verticales aux quatre coins du futur carrefour et remplissage de ces saignées avec du béton armé, de façon à constituer quatre piliers de section 5 m² environ, permettant de renforcer les appuis du toit du carrefour ;
- creusement et soutènement de la galerie de petit diamètre ;
- coulage du radier béton dans les deux galeries ;
- coulage du revêtement béton dans les deux galeries. Ce revêtement est solidaire des piliers.

7.6 Durabilité des ouvrages

La réversibilité du stockage suppose d'assurer la pérennité des puits et des galeries, aussi longtemps qu'il sera décidé de maintenir ouvertes les installations souterraines.

L'expérience industrielle, tant des tunnels de génie civil que des installations minières, montre que des ouvrages souterrains convenablement dimensionnés et construits peuvent être maintenus en service sur des durées supérieures à un siècle. Ce maintien en service implique généralement une maintenance des ouvrages. En effet, les exigences d'exploitation d'un ouvrage sont plus sévères que la simple garantie de sa stabilité d'ensemble. En effet, des désordres localisés peuvent empêcher l'exploitation en sécurité d'un ouvrage, alors que sa stabilité d'ensemble n'est pas remise en cause¹²³.

¹²² Pour les travaux de creusement éloignés des zones d'exploitation nucléaire et en dehors des zones de scellement, on pourrait envisager un creusement à l'explosif

¹²³ C'est cette stabilité d'ensemble et non pas l'exigence de sûreté d'exploitation qui est prise en compte quand on considère l'évolution à long terme de l'ouvrage après la fermeture du stockage.

L'importance des opérations de maintenance des ouvrages souterrains dépend du dimensionnement du soutènement et du revêtement. Au stade actuel des études, on a privilégié une approche de type génie civil : on met en place un revêtement épais permettant d'assurer la possibilité d'exploiter les galeries et les puits avec une maintenance réduite pendant une durée au moins séculaire. Au-delà, l'observation des ouvrages et une maintenance renforcée si besoin permettraient de maintenir leur stabilité sur des durées pluriséculaires.

7.7 Fermeture des installations souterraines

Les opérations de fermeture peuvent être conduites dans un schéma par étapes, intégrant la logique de réversibilité, notamment la possibilité de revenir en arrière. On se reportera au chapitre 10.

Lors des opérations de fermeture du stockage, des ouvrages sont construits pour limiter à long terme les déformations mécaniques de l'argilite, limiter la circulation d'eau et fractionner le stockage (voir section 7.1) [38].

Ces fonctions sont confiées à différents types d'ouvrages. La limitation des déformations mécaniques de l'argilite repose essentiellement sur un remblayage de l'ensemble des galeries. La limitation des écoulements d'eau repose sur des scellements, ouvrages localisés de faible perméabilité. Différents scellements sont implantés à des emplacements favorisant leur efficacité et leur redondance. Ils assurent ainsi le fractionnement du stockage.

La construction de ces ouvrages entre dans le cadre du pilotage par étape du processus de stockage, chaque type d'ouvrage pouvant marquer une étape de ce processus.

Ainsi, après le scellement d'alvéoles, on envisage le remblayage des galeries qui les desservent : galeries de liaison à l'intérieur d'une zone de stockage de déchets B, galeries d'accès aux alvéoles de déchets C, dans chaque module.

Puis pourrait intervenir la décision de fermer une zone de stockage. Il faudrait alors sceller les galeries de liaison donnant accès à cette zone : scellements à l'entrée d'une zone de déchets B, scellements de fractionnement d'une zone de stockage de déchets C.

Enfin viendrait le remblayage des galeries de liaison reliant les zones de stockage aux puits, et le scellement des puits. Des scellements construits dans les galeries à proximité des puits redoubleraient les scellements construits dans les puits.

On notera que l'expérience minière montre que la réouverture de galeries remblayées (ou scellés) est possible, moyennant des précautions pour reconstituer l'intégrité du soutènement et du revêtement au fur et à mesure du déblaiement de la galerie.

7.7.1 Le remblai des galeries courantes

7.7.1.1 Principes de conception

Le remblai courant doit pouvoir reprendre la pression des argilites, en considérant la possibilité, longtemps après la fermeture, d'une rupture du revêtement des galeries. Il s'agit de limiter les déformations de la roche à long terme, de façon à éviter ou limiter une extension de la zone endommagée autour des ouvrages.

Une rupture du revêtement se traduit par une convergence de l'argilite. Après reprise des éventuels vides laissés lors de mise en place du remblai, ce dernier se tasse et oppose une résistance croissante (son module de déformation augmente avec le niveau de contrainte) jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint entre l'argilite et le remblai.

L'endommagement potentiel de l'argilite au cours de ce processus dépend de deux facteurs : l'importance de la déformation totale et la vitesse de chargement de l'argilite. Cette dernière est en l'occurrence déterminante : une décharge instantanée peut conduire à un endommagement significatif

pour de faibles déformations ; une évolution très lente peut ne pas endommager la roche même pour de grandes déformations.

Aussi, on confère deux caractéristiques au remblayage : (i) les vides de mise en place doivent être aussi limités que possible ; (ii) le matériau doit avoir une « portance » suffisante, dès sa mise en place. La raideur du matériau augmente ensuite avec la compression opérée par l'argilite. Les études menées indiquent qu'un module de déformation initial de 10 MPa est à cet égard suffisant.

Le volume de remblai à mobiliser est important (plusieurs millions de mètres cubes). Il a donc été étudié la possibilité d'un réemploi de l'argilite excavée comme matériau de base du remblai. Une telle option présente un intérêt économique et limite les besoins en termes de matériaux d'apport.

Au voisinage des scellements, le remblai assure de plus un rôle de confinement mécanique ; cet aspect est traité à la section 7.7.2 relative aux scellements de galeries.

7.7.1.2 Description

Le remblai est constitué d'argilite excavée, reconditionnée après stockage en surface, par broyage à 20 millimètres. Sa teneur en eau est proche de celle de l'optimum Proctor normal (OPN)¹²⁴, soit 10 à 15 %. Une densité sèche du remblai à la mise en place d'au moins 1,6 est visée, avec un potentiel de gonflement de un à quelques pourcents.

7.7.1.3 Techniques de mise en place

Le remblai est d'abord préparé en surface, avant d'être acheminé jusqu'au chantier de remblayage. Sa mise en place peut s'effectuer par damage en couches horizontales en partie basse de galerie, en couches inclinées en couronne. Le damage en couches horizontales s'effectue par des matériels standard en travaux routiers. Pour le damage des couches inclinées, le matériel envisageable est une dameuse placée en extrémité du bras articulé d'un engin de chantier ; le damage en couches inclinées fait l'objet d'un essai de démonstration.

7.7.2 Les scellements de galerie

Chaque scellement de galerie de liaison est constitué d'un noyau à base d'argile gonflante, conférant à l'ouvrage sa très faible perméabilité, et de massifs d'appui en béton, assurant un confinement mécanique du noyau (cf. Figure 7.7.1). De part et d'autre, sur vingt à trente mètres environ, le remblai de la galerie est doté de propriétés mécaniques renforcées par rapport au remblai courant, pour contribuer au confinement mécanique de l'ouvrage.

Dans le cas du scellement des galeries d'accès aux alvéoles de stockage de déchets B, ce principe doit être adapté à la configuration particulière des alvéoles.

¹²⁴ L'OPN, optimum Proctor normal, est un essai normalisé qui détermine la teneur en eau d'un matériau la plus favorable à son compactage. Une teneur en eau légèrement supérieure à celle l'OPN favorise la tenue mécanique du remblai lors de la resaturation.

7.7.2.1 Principes de conception

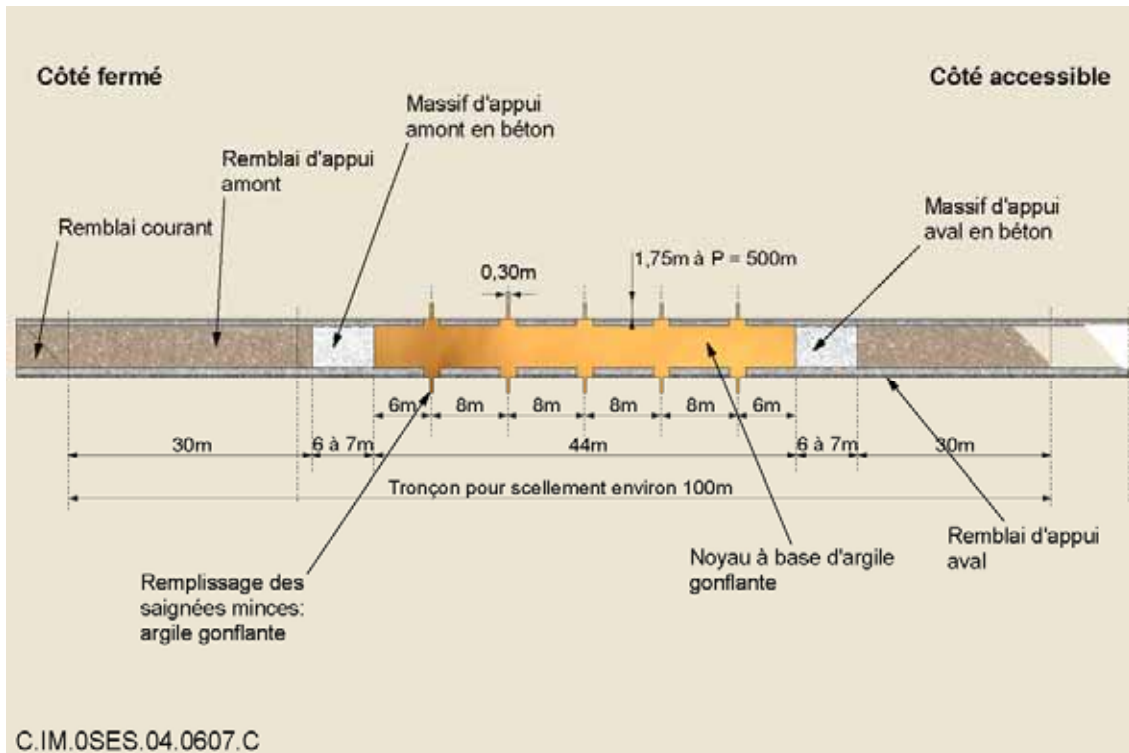


Figure 7.7.1 Schéma de scellement de galerie (avec coupures hydraulique de la zone fracturée)

L'argile gonflante est retenue comme matériau de base du noyau de scellement pour ses propriétés favorables. Sa très faible perméabilité répond à l'objectif de s'opposer à la circulation d'eau dans les galeries. Sa capacité de gonflement et de déformation lui permet, en présence d'eau, de combler les jeux laissés lors de la construction du noyau, et d'assurer un bon contact avec la paroi de la galerie ; ainsi, après gonflement de l'argile, le noyau n'offrira à l'eau aucun chemin possible d'écoulement privilégié. Enfin, son caractère naturel et sa compatibilité chimique avec l'argilite constituent des gages de grande durabilité.

Il est possible d'ajuster les propriétés hydromécaniques du noyau en agissant sur le mode de mise en œuvre et sur la formulation du matériau. En effet, la pression de gonflement que l'argile pourra développer augmente avec sa densité sèche moyenne dans l'ouvrage ; or cette densité dépend du taux de compaction de l'argile, lui-même fonction du mode de mise en œuvre. En matière de formulation, un ajout de sable, par exemple, peut faciliter la compaction et améliorer les propriétés mécaniques du matériau sans augmentation notable de perméabilité.

Pour que l'argile du noyau développe, puis conserve durablement, une pression de gonflement en présence d'eau, elle doit se trouver dans un volume confiné. Aussi le rôle des massifs d'appui en béton est de limiter l'expansion volumique du noyau ; pour ce faire, ils doivent résister mécaniquement à la pression développée par l'argile, en particulier pendant la phase transitoire d'hydratation et de gonflement du noyau. On ne peut exclure à très long terme une altération chimique du béton, qui réduirait ses propriétés mécaniques ; pour éviter qu'une telle altération n'entraîne une diminution de performance du noyau, les remblais d'appui relayeront alors le rôle des massifs en béton.

On notera que ces principes de conception des scellements de galeries sont comparables à ceux des bouchons d'alvéole de stockage de déchets C, présentés au chapitre 5.

7.7.2.2 Dimensionnement et technique de réalisation du noyau à base d'argile gonflante

● Dimensionnement et justification

La longueur retenue pour le noyau à base d'argile gonflante, environ 40 mètres, assure une performance de faible transmissivité hydraulique ; elle permet en particulier de réaliser plusieurs coupures hydrauliques de l'auréole d'argilite endommagée par l'excavation. Les motivations de telles coupures et leur définition seront présentées plus loin, au § 7.7.2.5.

Pour assurer sur le long terme, en toute situation, une pression de gonflement suffisante, la pression de gonflement initiale conférée à l'argile est de 3 MPa.

L'argile gonflante considérée est de type MX80¹²⁵ ou équivalent. Cette argile utilisée industriellement présente une perméabilité particulièrement faible : inférieure à 10^{-13} m/s à l'échelle du matériau. De plus, cette perméabilité apparaît moins dépendante de la densité sèche que la plupart des autres argiles industrielles (elle reste faible même à de faibles densités). Cette propriété est un avantage dans le cas présent, où une limitation de la pression de gonflement est recherchée.

En effet, pour ne pas risquer une fracturation de l'argilite en paroi d'excavation, la pression de gonflement du noyau ne doit pas excéder 13 MPa, comme dans le cas des bouchons d'alvéole de déchets C (voir le chapitre 5). En outre, les ouvrages d'appui seront d'autant moins sollicités que la pression de gonflement est faible. Néanmoins, cette pression doit rester suffisante pour assurer l'étanchéité au contact de la paroi de la galerie : pour disposer d'une réserve de gonflement, on vise à ce que la pression de gonflement du noyau soit toujours supérieure ou égale à 1 MPa au cours de l'évolution de l'ouvrage.

Cette évolution est dans son principe comparable à celle des bouchons d'alvéole de déchets C (chapitre 5). La pression de gonflement du noyau passe d'abord par un premier maximum après resaturation ; cette pression de gonflement initiale dépend uniquement de la formulation et des conditions de mise en place de l'argile (densité sèche, teneur en eau, jeux laissés à la mise en place). Puis peut intervenir une certaine relaxation, diminuant la pression de gonflement, si une altération des massifs d'appui autorise une expansion latérale du noyau : c'est dans cette situation, la plus pénalisante, qu'il convient de s'assurer que la pression de gonflement reste supérieure à 1 MPa. In fine la pression augmentera vers un état d'équilibre avec la roche, correspondant à la contrainte géostatique effective (soit 7 MPa à la profondeur du laboratoire de recherche souterrain).

Pour la situation pénalisante retenue pour le dimensionnement, la figure suivante présente (i) la diminution progressive de la pression de gonflement du noyau, avec son expansion volumique, (ii) l'augmentation de la capacité de confinement mécanique du remblai d'appui au fur et à mesure de son tassement du fait de la déformation appliquée par le noyau. Elle montre qu'en partant d'une pression de gonflement initiale de 3 MPa environ, le remblai peut bloquer la déformation du noyau alors que celui-ci présente une pression de gonflement résiduelle de 1 MPa.

¹²⁵ Il s'agit d'une smectite sodique naturelle extraite au Wyoming (Etats-Unis)

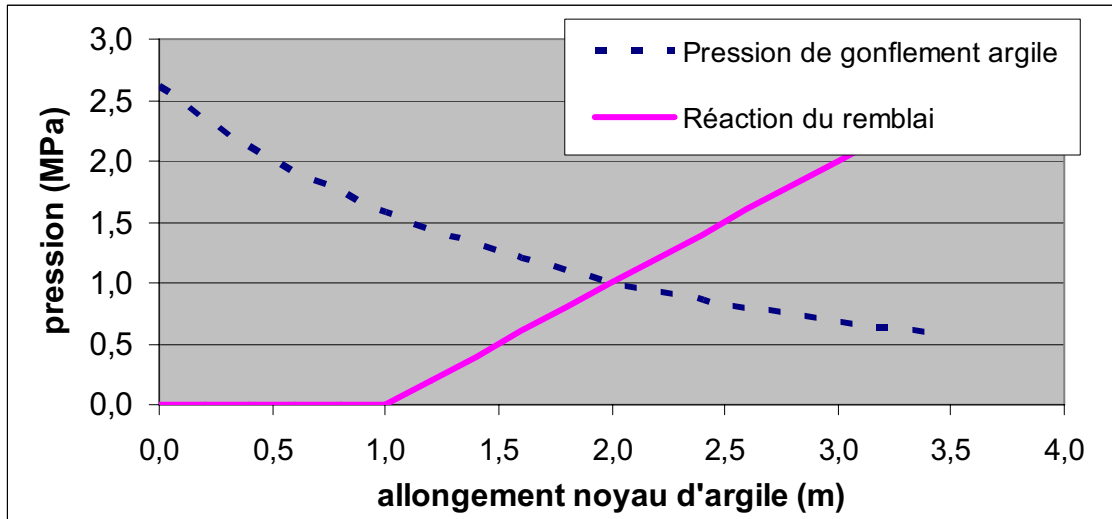


Figure 7.7.2 *Equilibre entre la poussée de gonflement du noyau et la réaction du remblai (déplacement initial de 1 m avant de solliciter le remblai et raideur du remblai de 1 m/MPa)*

On notera que, dans le cas des bouchons d'alvéole de déchets C, une plus grande pression de gonflement initiale est recherchée (voir le chapitre 5), en raison de la longueur limitée de ces bouchons.

● Construction, mise en forme et mise en place du matériau du noyau

Pour atteindre une pression de gonflement initiale de 3 MPa, les connaissances acquises sur l'argile gonflante type Mx80 [47] montrent que la densité sèche d'argile doit être de 1,4 à 1,5 environ (en cas de mélange, il s'agit de la densité de l'argile dans le mélange¹²⁶). C'est une valeur moyenne sur l'ouvrage tenant compte des vides à la mise en place [38].

Pour ce faire, deux techniques de mise en œuvre sont possibles. La première consiste à préfabriquer en usine des blocs compactés sous presse, puis d'assembler à sec ces blocs dans la galerie à sceller. Afin d'ajuster la pression de gonflement, les blocs sont constitués d'un mélange d'argile et de sable (à raison de 20 à 30 % de sable). La seconde technique est la projection de granulés (ou « pellets ») de haute densité, éventuellement mélangés à l'argile pulvérulente. La densité sèche moyenne recherchée peut s'obtenir, par exemple, avec des pellets d'argile compactée à la densité de 1,8 et un taux de vide entre les pellets de 20 %, représentatif d'une technique classique de projection.

Le recours à des blocs précompactés a été testé en vraie grandeur dans l'essai TSX mené dans le laboratoire de recherche souterrain canadien (Figure 7.7.3). Pour améliorer le remplissage de la galerie et obtenir un noyau plus homogène, les vides périphériques, notamment en voûte, ont été remplis de poudre d'argile (ou de mélange de pellets et de poudre).

¹²⁶ Masse d'argile/masse d'eau occupant le même volume que le mélange



Figure 7.7.3 Scellement expérimental constitué de blocs de bentonite – essai TSX mené au Canada (à l'échelle industrielle, ces blocs seraient de dimensions supérieures)

Pour mémoire, avant la construction du noyau, les équipements de la galerie tels que rails, conduites, câbles, ainsi que la bande de roulement auront été déposés pour éviter qu'ils ne constituent une voie de cheminement préférentiel de l'eau.

7.7.2.3 Les massifs d'appui

Les massifs d'appui prévus pour confiner mécaniquement le noyau doivent résister à la pression de gonflement exercée initialement, soit 3 MPa. Ils contribuent aussi à maîtriser la phase de resaturation du noyau : une géométrie simple du noyau et de la face d'appui favorise l'homogénéité de la resaturation et la prédictibilité de la pression de gonflement.

Ces massifs sont envisagés en béton à haute performance, non armé. Ces choix visent essentiellement la durabilité. Un béton BHP est plus compact, les eaux y percolent moins et son altération en est retardée d'autant. L'absence d'armature évite une fissuration liée à l'expansion des produits de corrosion. Elle induit en revanche une contrainte de conception : ces massifs doivent travailler uniquement en compression. Cela peut s'obtenir par une forme tronconique.

La faible perméabilité des massifs est aussi un gage de robustesse : elle contribue à limiter le flux d'eau qui parviendrait au noyau d'argile, en cas de mise en charge hydraulique brutale, et le protège alors d'un risque d'érosion mécanique.

7.7.2.4 Description et technique de réalisation des remblais d'appui

À terme, les massifs d'appui peuvent, tout comme le revêtement de galerie, subir une altération chimique. Comme indiqué plus haut, c'est alors le remblai d'appui qui prend en charge le confinement mécanique du noyau gonflant.

Le principe retenu est de limiter le déplacement du scellement par le frottement du remblai sur la paroi de la galerie. Le remblai d'appui doit en conséquence être doté de rigidité et de frottement. Un module de déformation de 20 MPa est considéré ainsi qu'un angle de frottement (interne ou sur béton) de 40°. Ces propriétés peuvent s'obtenir avec un mélange, en proportions voisines, d'argilite excavée et de sable, l'argilite excavée étant broyée et criblée à 20 mm comme pour le remblai courant.

La longueur du remblai d'appui permet au frottement entre le remblai et la paroi de la galerie d'équilibrer la pression de gonflement du noyau. Cette longueur est d'environ quatre fois le diamètre excavé¹²⁷.

La mise en place de ce remblai d'appui s'effectue, pour l'essentiel, avec les mêmes techniques que celles pour les remblais courants. Le clavage (remplissage) en couronne de la galerie peut être amélioré par des injections de poudre d'argile.

7.7.2.5 Le traitement de la zone d'argilite endommagée par l'excavation des galeries

La zone endommagée d'argilite autour de l'ouvrage de scellement peut limiter la performance globale de celui-ci, si cette zone présente des propriétés hydrauliques inférieures à celles de la roche ou du noyau en argile gonflante. L'Andra a considéré deux options de conception, en fonction de la présence ou non d'une zone endommagée plus perméable (en particulier d'une zone fracturée).

● **Options de conception considérées**

La première option consiste à déposer le revêtement sur toute la longueur du noyau d'argile, et assurer un contact direct entre l'argile gonflante du scellement et l'argilite. Cette solution convient si la zone endommagée est d'extension limitée, son évolution la conduisant à recouvrer une faible perméabilité. En effet, la pression exercée par le gonflement du noyau, le fluage ou la relaxation de l'argilite peuvent conduire à restaurer des propriétés proches de celles de la roche non endommagée, par refermeture de la fissuration. Un tel processus a été observé dans l'argile du laboratoire souterrain du Mont Terri, en Suisse. Cela peut aussi résulter d'une cicatrisation ou d'un colmatage d'origine chimique des fissures.

La seconde option permet de gérer l'apparition d'une zone fracturée de plus grande extension, pour laquelle des incertitudes existent sur sa capacité à recouvrer une perméabilité proche de celle de la roche non endommagée. Elle consiste à interrompre la zone fracturée par des saignées minces, remplies ensuite d'argile gonflante. L'efficacité de ces coupures hydrauliques réside dans le remplacement de l'argilite éventuellement fracturée par un matériau moins perméable. La technique envisagée pour la réalisation de ces saignées limite l'apparition de nouvelles zones endommagées. Toutefois, si une zone endommagée devait être créée, à leur extrémité notamment, il a été vérifié que les coupures hydrauliques conserveraient leur efficacité, ces nouvelles zones endommagées ne se connectant pas entre elles, ou avec celles préexistantes. Le revêtement de la galerie peut en outre être maintenu de part et d'autre des saignées.

Sur le site étudié, l'apparition d'une zone fracturée est considérée possible autour des galeries. Par prudence au stade actuel des connaissances, l'Andra considère en référence la seconde option pour les scellements de galeries : coupures hydrauliques, avec dépose locale du revêtement.

● **Description**

Les saignées considérées ont 30 cm d'épaisseur environ et une profondeur de 1,5 à 3,0 m. Cette profondeur est supérieure à l'épaisseur du revêtement et de la zone fracturée éventuelle d'argilite. Elle permet à la saignée de s'ancrer dans une zone d'argilite qui n'aura été que microfissurée lors de la réalisation de la galerie.

L'espacement envisagé entre saignées est de 8 m environ ; cette valeur pourra être ajustée, au vu de l'extension des zones endommagées induites, pour optimiser l'efficacité hydraulique des coupures.

Les saignées sont remplies d'argile gonflante (de type MX80 comme le noyau). L'objectif est de disposer d'une pression de gonflement à la mise en place de l'ordre de 3 MPa sur les faces de la saignée. La densité de l'argile et les vides de mise en place sont ajustés à cette fin.

¹²⁷ On considère ici le diamètre excavé et non le diamètre utile : lorsque le remblai est mobilisé en appui, le revêtement qui l'entoure peut être lui aussi dégradé ; il peut alors être considéré comme partie intégrante du remblai d'appui et résiste par son frottement sur l'argilite en paroi d'excavation.

Le revêtement est déposé sur 1,30 m environ au droit de chaque saignée, afin de disposer de 0,5 m de part et d'autre ; la distance séparant ainsi le béton et l'argile des saignées limite dans cette dernière une éventuelle perturbation alcaline : l'argile conserve ainsi une capacité de gonflement suffisante.

● **Construction des coupures hydrauliques**

Le revêtement est déposé localement. Les saignées sont creusées au moyen d'une scie équipée de pics, dont l'outil de coupe est semblable aux « haveuses » utilisées depuis des dizaines d'années dans les mines de sel ou de charbon pour effectuer des saignées dans les massifs rocheux.

La faisabilité technologique de la réalisation d'une saignée a été testée dans le laboratoire du Mont Terri (essai EZ-A). L'essai a permis de s'assurer de la possibilité de réaliser de telles saignées, ainsi que de vérifier leur efficacité pour interrompre la zone fracturée de la roche. Un essai est également prévu dans le laboratoire de Meuse/Haute-Marne (essai KEY).

Le remplissage des saignées peut être réalisé par l'assemblage de blocs de bentonite précompactés. Ces blocs sont mis en place mécaniquement à l'aide d'érecteurs ; leur masse unitaire peut varier de la centaine de kilogrammes à plusieurs tonnes suivant les méthodes mises en œuvre. Des injections de poudre de bentonite permettent de remplir les interstices.



Figure 7.7.4 Scie construite pour l'essai KEY au laboratoire de Meuse/Haute Marne (à gauche) et essai EZ-A au laboratoire du Mont Terri (à droite)

7.7.2.6 Cas particulier des scellements d'alvéole de stockage de déchets B

La conception du scellement présentée ci-avant est légèrement adaptée pour la fermeture d'une alvéole de stockage de déchets B (Figure 7.7.5).

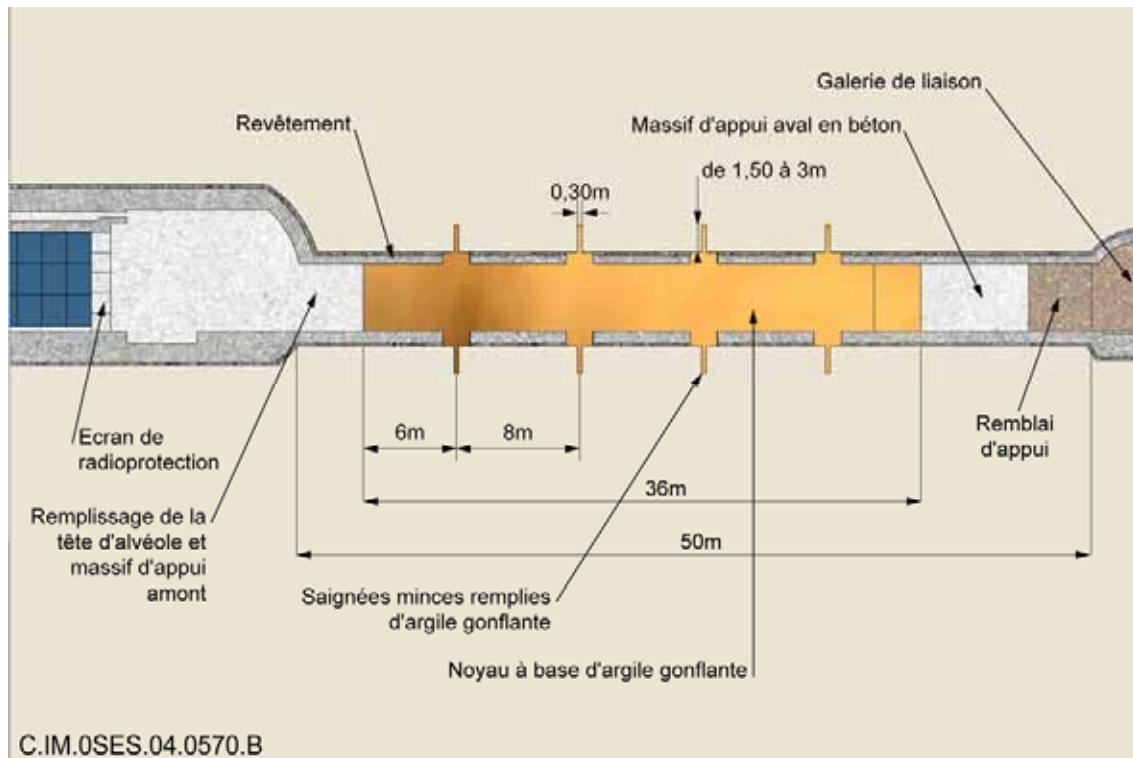


Figure 7.7.5 Schéma de scellement d'alvéole de stockage de déchets B

En amont du scellement, du côté de l'alvéole, la géométrie du massif d'appui s'adapte à celle de la tête d'alvéole (voir section 5.1). Par ailleurs, les dimensions de la galerie d'accès à l'alvéole permettent d'implanter le noyau de scellement hors d'influence de la zone endommagée de la galerie de liaison.

7.7.3 Les scellements de puits

7.7.3.1 Principes de conception

La fermeture d'un puits comprend deux scellements et des remblais (Figure 7.7.6).

Un premier scellement, établi en partie supérieure de la formation d'argilite étudiée, isole le stockage des formations géologiques sus-jacentes. Sa perméabilité vise à être aussi faible que possible. Comme en galeries, son noyau est à base d'argile gonflante. Ce noyau repose sur un massif d'appui en béton occupant la base du puits, la recette et s'étendant sur une longueur pluri décimétrique dans les galeries qui s'y raccordent. La robustesse mécanique de ce massif assure la stabilité de l'ensemble des ouvrages de fermeture superposés dans le puits. Le poids des matériaux sus-jacents peut contribuer à terme au confinement du noyau gonflant ; un massif d'appui est néanmoins construit au-dessus du noyau pour jouer un rôle mécanique durant la phase de resaturation.

Le premier scellement est surmonté d'un remblai, jusqu'au sommet de l'Oxfordien calcaire. Le matériau utilisé est identique à celui du remblayage des galeries.

Au-dessus du remblai est construit un second scellement séparant les niveaux plus perméables des formations de couverture. Ces niveaux constituent trois ensembles hydrauliquement indépendants : l'Oxfordien calcaire, le Kimméridgien (deux bancs calcaires) et le Tithonien. Ils ne sont pas à proprement parler aquifères sur le site étudié ; il s'agit néanmoins d'y restaurer des conditions hydrauliques proches de leur état initial. Le scellement de séparation pourra se situer dans le niveau marneux inférieur du Kimméridgien, avec une hauteur de 10 à 15 mètres. Sa constitution est similaire à celle du scellement d'isolation du stockage, détaillée dans la suite.

En partie supérieure du puits, un remblai complète le remplissage jusqu'en surface.

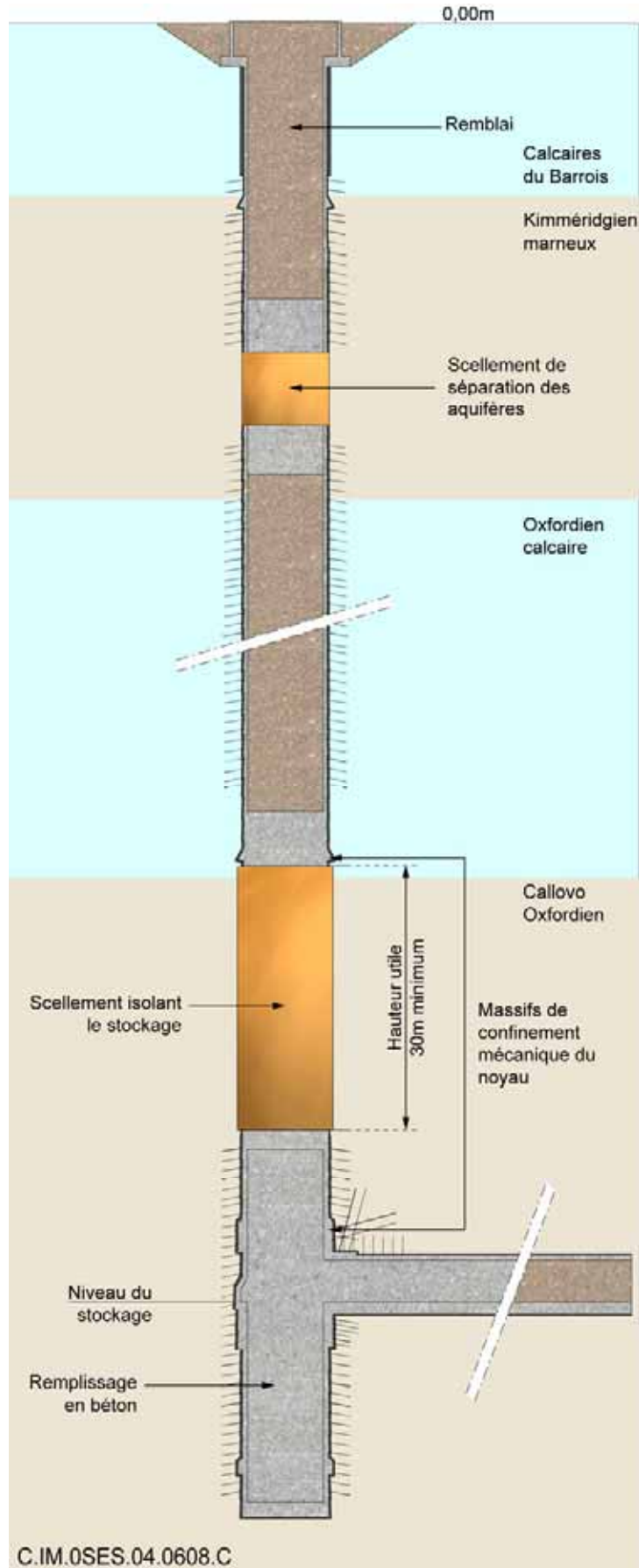


Figure 7.7.6

Schéma de scellement de puits – vue d'ensemble

7.7.3.2 Description et dimensionnement du scellement d'isolation du stockage

● Implantation et hauteur

Le scellement est établi sur la plus grande hauteur possible, en partie supérieure du Callovo-Oxfordien. Dans cette partie, les argilites sont mécaniquement plus résistantes qu'au niveau médian de la formation. L'épaisseur de ces niveaux plus résistants est d'au moins une trentaine de mètres (38 m au droit du laboratoire souterrain [6] - Tome 1). Les connaissances acquises conduisent à prévoir que la réalisation des puits n'y provoquera pas l'apparition de zone fracturée [38]. Il est envisagé de déposer le revêtement lors de la réalisation du scellement sur toute la hauteur du noyau. Le matériau gonflant se trouve ainsi au contact direct de l'argilite.

● Le noyau gonflant

Le noyau est à base d'argile gonflante de type MX80 ou équivalent. Ce choix est motivé par les mêmes considérations que pour les scellements de galerie. La pression de gonflement visée à la mise en place (après reprise des vides de mise en place) est de 7 MPa. Cette valeur correspond à la contrainte principale mineure (effective). Ce niveau élevé est compatible avec la robustesse mécanique des ouvrages d'appui.

La pression recherchée peut s'obtenir avec une densité sèche du matériau¹²⁸ de 1,8 et 10 % de jeux de mise en place.

Comme pour les scellements de galeries, deux modes de mise en œuvre sont envisageables : pellets (ou mélange de pellets et de poudre) et blocs précompactés. Pour les pellets et les poudres, une mise en œuvre par projection conduit tout d'abord à des densités de l'ordre de 1,4 à 1,5 ; il est ensuite possible d'effectuer une compaction mécanique, pour obtenir les densités visées. Des blocs précompactés permettent quant à eux d'obtenir directement les densités ciblées. La Figure 7.7.7 présente un arrangement possible de blocs précompactés de grandes dimensions, dont la masse unitaire serait proche de 4 500 kg.

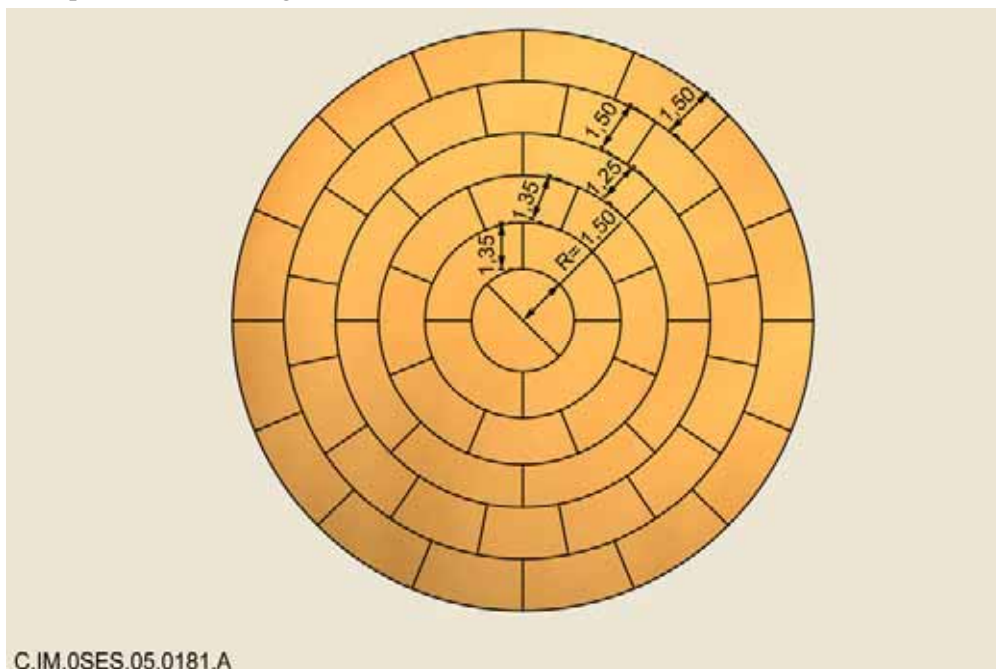


Figure 7.7.7 Appareillage de briques d'argiles gonflantes pour le scellement d'un puits

¹²⁸ En cas de mélange argile-sable, cette valeur est celle de la densité de la fraction argileuse dans le mélange ; ainsi, pour un mélange de 70 % d'argile type MX80 et de 30 % de sable, la densité correspondante du mélange serait de 1,95.

● Le massif d'appui supérieur

Un massif de confinement en béton surmonte le noyau. Il est ancré dans la roche, sur laquelle il s'appuie pour résister à la poussée de l'argile gonflante. Son efficacité est ainsi indépendante de l'état du revêtement du puits.

La géométrie de ce massif est de deux troncs de cône opposés à 35°, lui permettant de travailler en compression, et évitant ainsi l'emploi d'armatures.

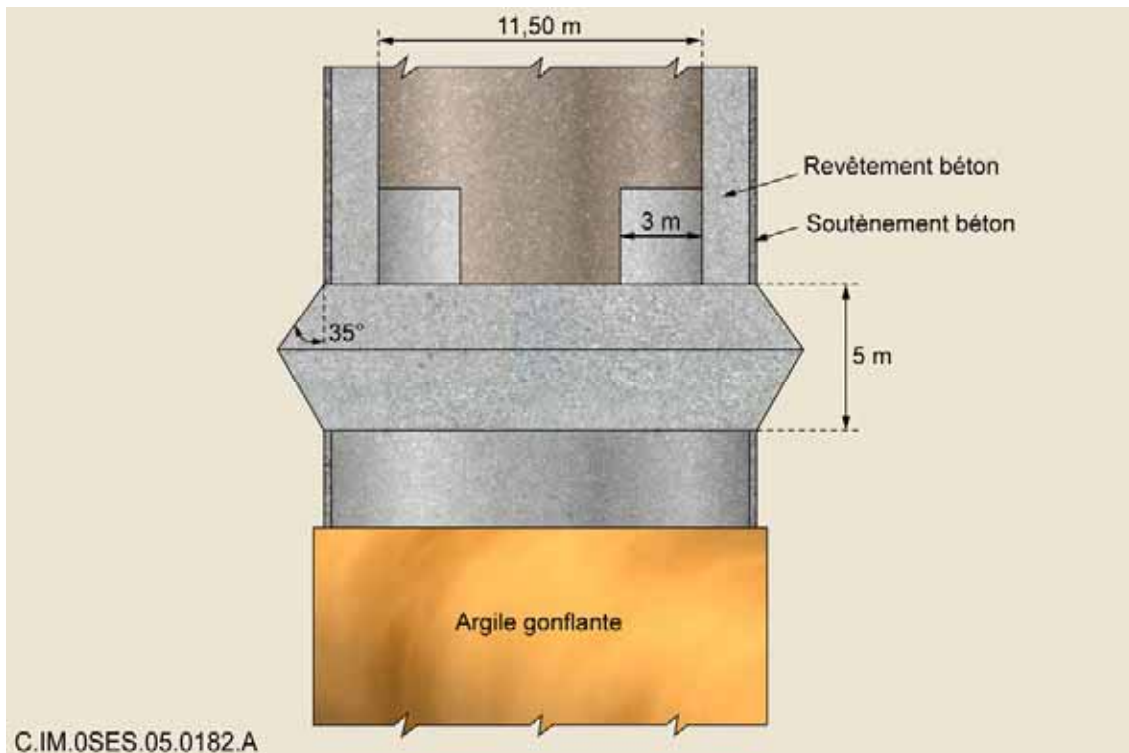


Figure 7.7.8 Massif de confinement d'un scellement de puits

7.7.3.3 Techniques de construction

Afin de procéder à la fermeture du puits, ce dernier est d'abord déséquipé. Les opérations de fermeture peuvent s'effectuer à l'aide d'un équipement analogue à celui utilisé pour un fonçage.

Pour ce qui concerne la construction de noyaux d'argile, la dépose du revêtement et la mise en place de l'argile sont menées conjointement : ces opérations sont réalisées par passes successives, de façon à limiter la hauteur non soutenue pour assurer la sécurité du chantier. Le revêtement est ainsi déposé par tranches de deux mètres de hauteur environ. Un surfacage de la paroi du puits peut s'effectuer à l'aide d'une petite machine à attaque ponctuelle. La pose de grillage et de cintres permettra si besoin de soutenir le parement découvert. On procède ensuite à la mise en place de l'argile gonflante sur la hauteur de la tranche, en enlevant progressivement le soutènement provisoire.

Afin de prendre en compte les incertitudes sur le comportement dans la durée de l'argilite, au regard de la stabilité mécanique du parement du puits, une variante a été étudiée. Celle-ci consiste à maintenir en place de part en part des anneaux de revêtement, renforcés mécaniquement. Le parement du puits n'est ainsi découvert que sur des tronçons de 7 mètres environ, séparés par des anneaux de longueur 3,50 m. Le renforcement des anneaux consiste en un ancrage dans l'argilite, au moyen de plots radiaux en béton.

Pour construire les massifs de confinement, le béton est simplement coulé en place.

Enfin, la mise en place des remblais peut s'effectuer classiquement par compactage en place, en couches horizontales de quelques décimètres d'épaisseur.

8

Les installations de surface

8.1	Organisation générale des installations de surface	326
8.2	Zone nucléaire	327
8.3	Zone industrielle et administrative	329
8.4	Verse à déblais.....	330

Les activités de construction, d'exploitation et de fermeture d'un stockage nécessitent des installations de soutien implantées en surface. Ce chapitre en présente les principales caractéristiques.

Il précise tout d'abord les principes d'organisation générale des installations de surface regroupées sur un seul site.

Il expose ensuite la conception de la « zone nucléaire » essentiellement constituée du bâtiment de réception des colis primaires et de préparation des colis de stockage. Cette conception est sous-tendue par l'hypothèse que ces opérations seraient réalisées sur le site de stockage. Les analogies entre les installations envisagées et d'autres installations nucléaires existantes sont mises en exergue. La faisabilité de ces installations ne pose pas de problématique technique nouvelle. Leur conception peut notamment s'appuyer sur des dispositions éprouvées dans des installations analogues en matière de sécurité et de protection de l'environnement.

Ce chapitre décrit également la zone industrielle et administrative qui regroupe les installations relatives aux activités non nucléaires.

Enfin, une attention particulière est apportée à la zone de stockage des déblais de creusement désignée par le terme minier « verse ». Son impact environnemental est sommairement analysé. Il est supposé ici que l'ensemble des volumes de roche extraite est stocké sur le site, de manière temporaire pour la part de ces volumes réutilisée ultérieurement comme matériau de remblai.

Des schémas possibles d'installations de surface sont donnés à titre illustratif. Ils ne figent aucune option et présentent à ce stade un caractère très préliminaire. Il est important de noter que ces schémas ne sauraient prendre en compte de contrainte associée à un lieu d'implantation, telle que la topographie ou le voisinage. Ces schémas permettent néanmoins d'évaluer globalement les dimensions des installations de surface, en particulier leur emprise au sol, et d'en estimer globalement la sensibilité aux scénarios d'étude décrits au chapitre 3.

8.1 Organisation générale des installations de surface

Les installations de surface se répartissent en quatre zones principales :

- la zone nucléaire, d'une superficie d'environ 25 ha, où sont accueillis les colis primaires de déchets et où sont préparés les colis de stockage ;
- la zone industrielle, d'une superficie d'environ 35 ha, où sont rassemblés les ateliers et installations nécessaires au soutien des travaux souterrains ;
- la zone administrative, d'une superficie d'environ 20 ha, regroupant les bureaux, parkings, et bâtiments à caractère social ;
- la verse où sont stockés les déblais, d'une superficie comprise entre 120 et 300 ha suivant les scénarios.

On notera que la superficie allouée aux zones industrielle et administrative, soit 55 ha, est du même ordre de grandeur que la superficie occupée par les installations de surface d'un grand chantier de travaux souterrains tel que celui de construction du tunnel sous la Manche.



Figure 8.1.1 Vue d'ensemble des installations de surface

8.2 Zone nucléaire

8.2.1 Logique d'ensemble de la zone nucléaire

Au sein des installations de surface, la zone d'activités « nucléaire » se présente comme une zone industrielle spécifique, dont l'accès est contrôlé. Elle comprend :

- une zone contrôlée traditionnelle (sans risque spécifique lié à l'activité nucléaire) comprenant les installations support (bâtiment pompier, entrepôts de matériaux...). La fabrication et l'approvisionnement des composants nécessaires à la réalisation des colis de stockage nécessitent en effet a minima de disposer d'un entrepôt de stockage de ces composants ;
- une zone « sensible » qui correspond aux installations nucléaires soumises à la réglementation « Installation Nucléaire de Base » (INB). Cette zone est délimitée par une clôture de protection physique complète et un deuxième niveau de contrôle d'accès. Elle comprend les installations de déchargement et d'entreposage d'attente des emballages de transport, les bâtiments de réception des déchets et de préparation des colis de stockage, le puits de transfert des colis dans les installations souterraines et le puits de retour d'air.

Les fonctionnalités de la zone « sensible » nucléaire en termes de type de déchets à gérer dépendent du scénario d'étude considéré. Elle comprend des bâtiments affectés aux déchets B et C. Dans les scénarios d'étude faisant l'hypothèse d'un stockage de combustibles usés, un bâtiment dédié serait ajouté.

8.2.2 Bâtiment de réception des déchets B et C et de préparation des colis de stockage

Le bâtiment de réception des déchets B et C et de préparation des colis de stockage comprend schématiquement trois parties :

- une zone de déchargement des emballages de transport des déchets primaires ;
- une zone de fabrication et d'entreposage des colis de stockage ;
- une zone de transfert des colis de stockage vers le puits de descente.

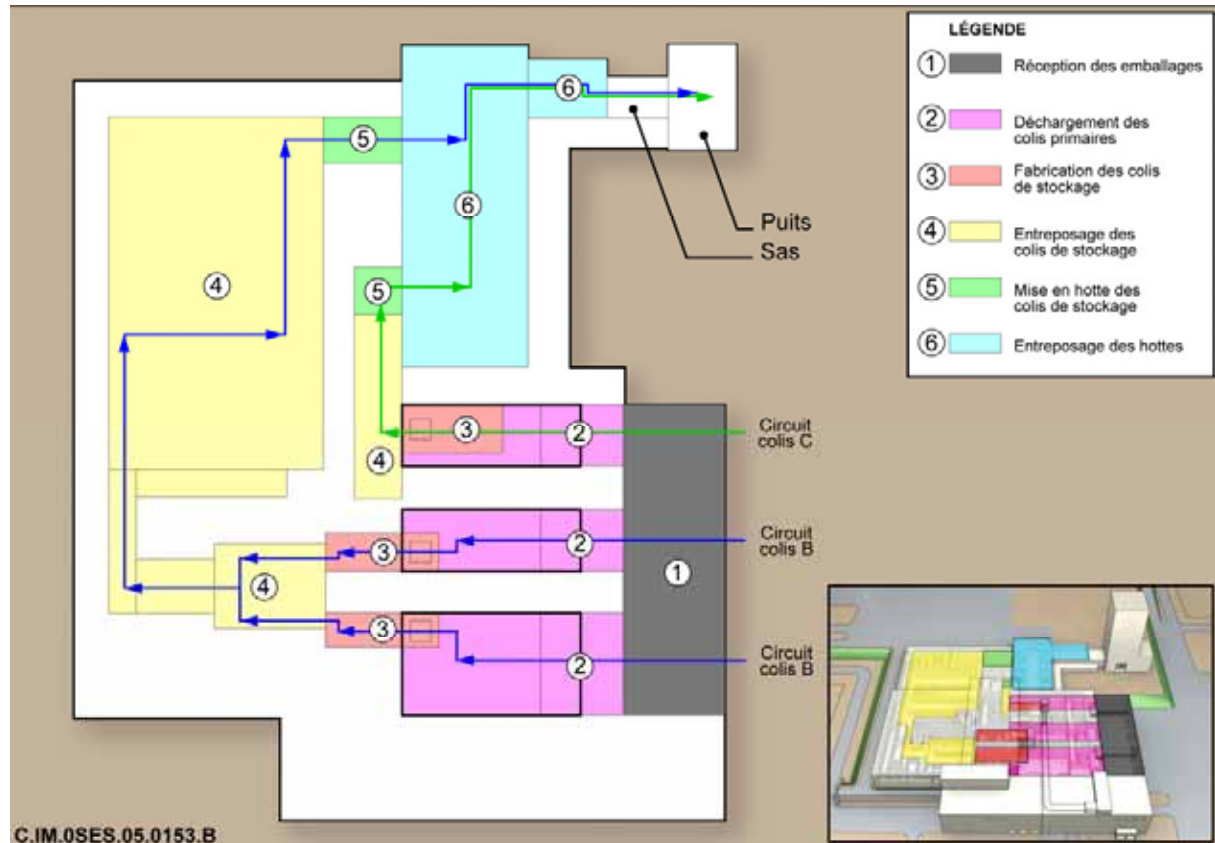


Figure 8.2.1 Bâtiment pour déchets B et C

La zone de déchargement des emballages est équipée d'un pont roulant et de cellules blindées. Les colis primaires extraits sont placés dans un entreposage tampon avant reprise pour mise en colis de stockage.

La zone de fabrication et d'entreposage des colis de stockage est constituée de plusieurs lignes de fabrication. Chaque ligne est constituée d'une succession de cellules blindées. Il est envisagé deux lignes pour la fabrication des colis de stockage B et une ligne pour la fabrication des colis de stockage C.

Les lignes pour déchets B sont notamment équipées d'une installation de bétonnage permettant la fermeture des conteneurs en béton. Les conteneurs pleins sont entreposés dans une salle de mûrissement pendant le temps nécessaire à l'obtention des propriétés mécaniques suffisantes avant transfert au fond de puits (environ 28 jours).

La ligne pour déchets C est équipée d'une installation de démagnétisation et de soudure par faisceau d'électrons permettant de souder le couvercle sur le corps du surconteneur. Les colis de stockage sont mis en attente dans un entreposage tampon.

Dans la zone de transfert vers le puits, les colis de stockage sont acheminés jusqu'au poste de mise en hotte. La hotte est ensuite convoyée vers le puits qui en assure le transfert au fond.

Tous types d'activités prévus dans ce bâtiment sont déjà mis en œuvre dans des réalisations industrielles nucléaires similaires.

Un tel bâtiment fonctionnerait de façon continue 24 heures sur 24 pendant 225 jours par an. Pour mémoire, les flux pris en compte dans l'étude sont les suivants :

- 5 000 colis primaires B par an ;
- 400 colis primaires C0 par an, puis à 600 ou 700 colis primaires C1 à C4 par an suivant les scénarios) ;
- capacité de production de 1 400 colis de stockage B en moyenne par an ;
- capacité de production de 600 ou 700 colis de stockage C par an.

8.2.3 Bâtiment de surface pour réception et mise en conteneur des combustibles usés

Dans le cas où le stockage de combustibles usés (UOX et MOX) serait considéré, il serait nécessaire d'étendre le bâtiment de traitement pour leur accueil et conditionnement avant transfert vers les installations souterraines. Ce dernier pourrait être une extension se raccordant au bâtiment précédent.

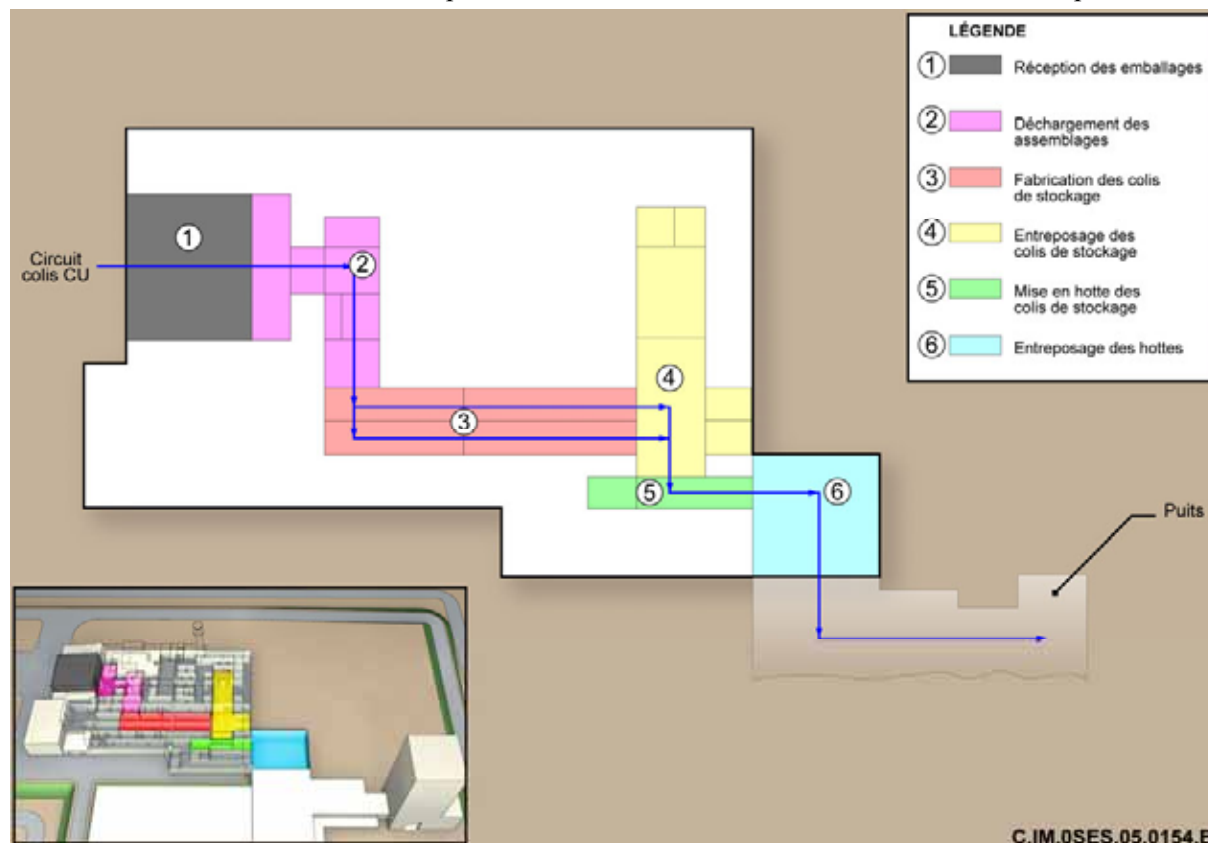


Figure 8.2.2 Bâtiment pour combustibles usés

8.3 Zone industrielle et administrative

La zone industrielle couvre une superficie d'environ 35 ha. Elle est organisée autour du puits de travaux. Ces installations regroupent notamment :

- les bâtiments d'exploitation du puits de travaux ;
- des ateliers de préparation de matériaux de construction (revêtements de galerie, etc.) ;
- des ateliers de maintenance et réparation des équipements (électriques, hydrauliques mécaniques, électromécanique, chaudronnerie, câblerie...) ;
- des bâtiments de service (entrepôts, magasins, carothèque, laboratoire béton, etc.).

Cette zone industrielle est aménagée progressivement en fonction de l'évolution des besoins des travaux souterrains. À titre d'exemple, les installations de préparation de remblais pourront n'être construites que lorsqu'une décision de fermeture interviendra.

Les installations de surface permettant la gestion et l'administration du site sont regroupées autour du puits de personnel. Il s'agit essentiellement de bâtiments à usage de bureaux, du bâtiment central de secours et de l'espace « vie » du personnel travaillant sur le site (vestiaires, douches, réfectoires...).

8.4 Verse à déblais

Les déblais en provenance des chantiers de creusement sont stockés dans une verse construite aux abords de la zone de travaux. Ces déblais sont réutilisés au maximum pour constituer les remblais de fermeture du stockage, à hauteur d'environ 40 %. Le reste des déblais reste en surface¹²⁹.

● Évaluation sommaire de l'emprise

La verse à déblais représente un volume de plusieurs millions de mètres cubes, volume couramment rencontré (et même au-delà), dans les exploitations minières à ciel ouvert. La date de remblayage n'étant pas fixée à l'avance, on a évalué l'emprise d'une verse permettant d'accueillir l'ensemble des déblais.

En l'absence de site de verse défini, on ne peut que donner des principes généraux de gestion de la verse, qui devront être adaptés à la topographie du site. En particulier, un compromis devra être trouvé entre la hauteur de la verse et son emprise, la gestion d'une verse pouvant être d'autant plus flexible que sa hauteur est limitée. À ce stade des études, il a été pris en compte une verse de faible hauteur, à savoir une dizaine de mètres. L'emprise de la verse pourrait alors se situer entre 100 et 300 hectares.

● Principes généraux de conception et de fonctionnement de la verse

Le projet de verse devrait être étudié de façon à favoriser au mieux son intégration dans le paysage et dans le réseau hydrographique.

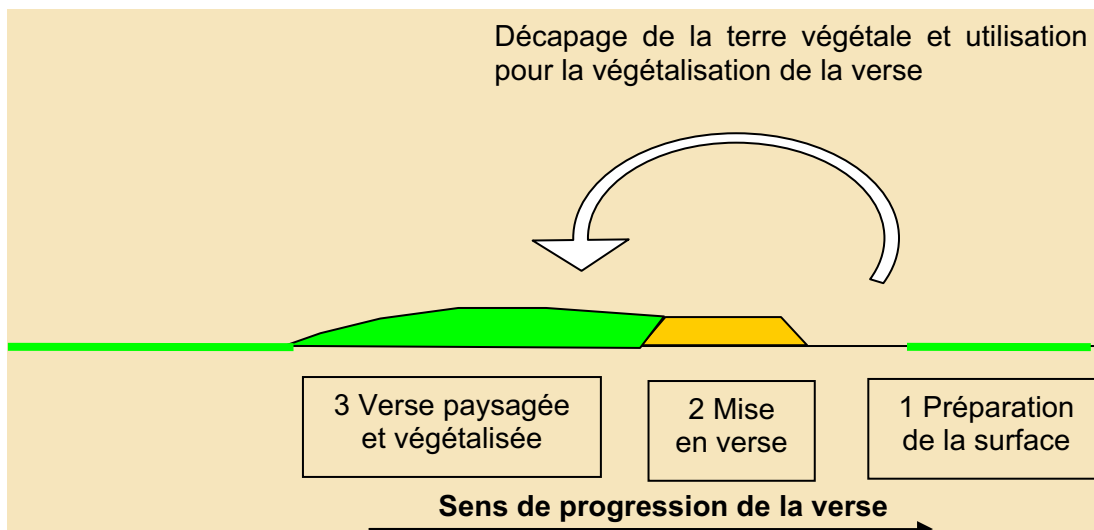


Figure 8.4.1 Principe d'exploitation d'une verse par tranche

Une verse est généralement exploitée par tranches. Les opérations de décapage et surfacage, de construction du réseau de drainage, de mise en place de déblais et de couverture des déblais se succèdent et progressent dans le sens de développement de la verse.

¹²⁹ La différence par rapport à 100 % s'explique par les volumes occupés par les colis de stockage et par le revêtement des ouvrages, et par l'effet de « foisonnement » du remblai

Outre les aspects géométriques, la verse est essentiellement conçue pour assurer la stabilité des déblais et limiter la percolation des eaux pluviales dans les matériaux stockés.

Des travaux préparatoires de terrassement, de décapage de la terre végétale, de confection d'un fond de forme et de construction de fossés, talus et bassins de collecte et de décantation, seront nécessaires. Une organisation de chantier spécifique est requise en vue de limiter la durée d'exposition de la verse active aux intempéries.

Enfin, les terres végétales issues des décapages des différentes zones où sont construites les installations de surface et de la verse sont regroupées et stockées à proximité de cette dernière. Elles sont utilisées au fur et mesure des besoins pour couvrir la verse en vue d'une végétalisation.

- **Récupération des déblais sur la verse pour les opérations de remblayage**

La reprise des déblais d'une verse pour des opérations de remblayage peut également être conduite par tranche, de façon analogue à l'organisation de la mise en verse.

Les matériaux de remblayage provenant d'une reprise de la verse nécessitent un conditionnement avant leur utilisation comme remblai. Ce conditionnement peut comporter en particulier des opérations de régularisation de la granulométrie et de l'humidité des matériaux de remblayage.

9

Les moyens d'exploitation nucléaire du stockage

9.1	Réception des colis primaires et préparation des colis de stockage	334
9.2	Processus de transfert des colis de stockage depuis la surface jusqu'aux alvéoles de stockage	340
9.3	Processus de mise en place des colis dans les alvéoles de stockage.....	348

L'objet du présent chapitre est d'exposer les moyens qui pourraient être mis en œuvre pour les activités d'exploitation à caractère nucléaire et d'en décrire leurs principales caractéristiques ainsi que les procédés associés.

Ces activités concernent la réception des colis primaires et la préparation des colis de stockage, le transfert de ces colis dans les installations souterraines et leur mise en place dans les alvéoles de stockage. Pour l'ensemble de ces processus, ce chapitre s'attache à montrer que les moyens et les procédés étudiés à ce stade des études sont simples, robustes et sûrs. Ceux-ci résultent en effet d'une part du retour d'expérience industrielle d'installations nucléaires ou minières existantes et d'autre part de choix fondés sur une analyse comparative de plusieurs solutions possibles.

En matière de procédés nucléaires il est mis en exergue comment les considérations de sûreté (notamment de protection radiologique) et de fiabilité des chaînes cinématiques ont été prises en compte dans la conception.

Les solutions adoptées à l'étranger et les premiers résultats d'un programme de démonstration technologique en cours sont enfin mentionnés.

9.1 Réception des colis primaires et préparation des colis de stockage

La présente section expose les moyens et les procédés de réception des emballages de transport contenant les colis primaires de déchets, puis décrit ceux relatifs à la fabrication des colis de stockage.

Les installations nucléaires de surface, dans lesquelles sont mises en œuvre ces activités, présentent de nombreuses similarités avec certaines installations nucléaires existantes telles que le centre de retraitement COGEMA de La Hague ou l'entreposage néerlandais COVRA. Les principes d'exploitation et les moyens associés présentés dans les sections ci-dessous résultent ainsi largement d'une transposition du retour d'expérience industrielle et d'une adaptation aux spécificités des colis de déchets à traiter.

9.1.1 Réception des emballages de transport, déchargement et entreposage des colis primaires de déchets

Les colis de déchets primaires sont acheminés depuis les sites de production jusqu'au site de stockage dans des emballages de transport identiques ou analogues aux emballages existants. Ces emballages pourraient être transportés par convoi routier ou ferroviaire, puis, par analogie avec les pratiques nucléaires, entreposés sur une aire dédiée des installations de surface.

À l'issue de leur entreposage, les emballages sont transférés dans un bâtiment dit de « réception et conditionnement » contenant une succession de cellules blindées dans lesquelles les opérations sont réalisées de manière téléopérée. Les emballages sont accostés à une cellule de déchargement et les colis primaires sont extraits par un pont de manutention équipé d'une pince spécifique à chaque type de colis. Les colis primaires sont ensuite transférés dans une zone du bâtiment dédiée à leur entreposage.

Les opérations décrites ci-dessus (identiques pour tous les types de déchets) sont illustrées par le schéma de la Figure 9.1.1.

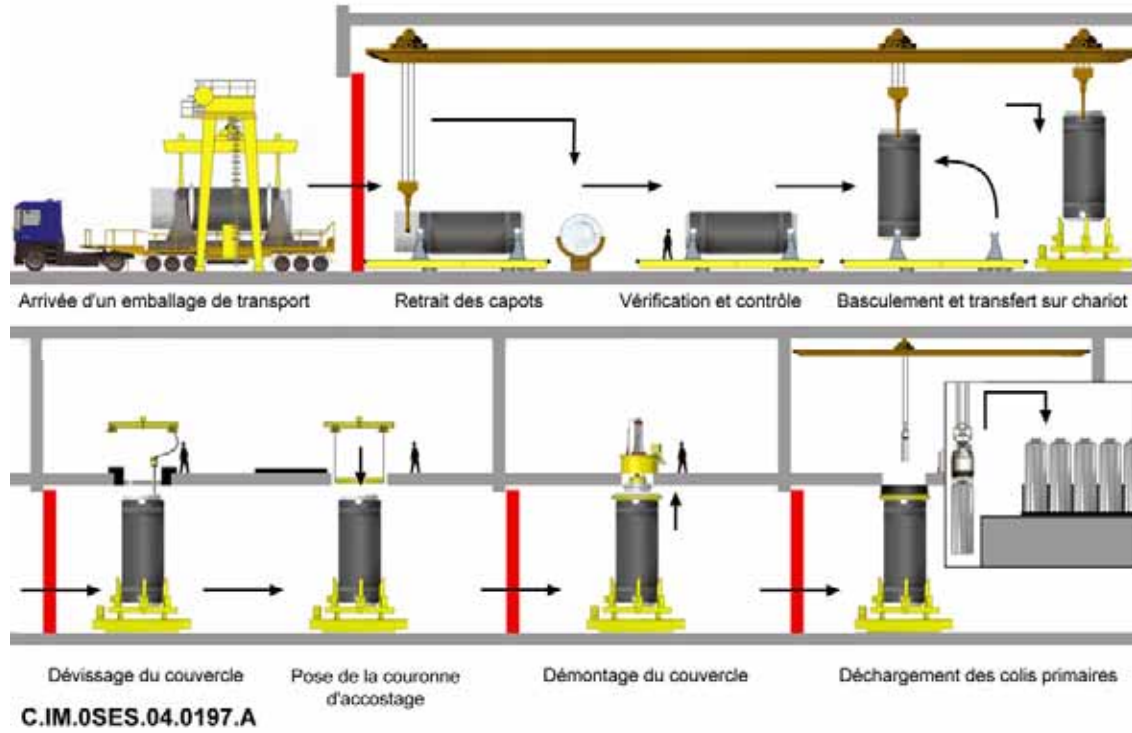


Figure 9.1.1 *Synoptique des opérations de réception des colis primaires*

De telles opérations sont classiquement réalisées sur le centre COGEMA de La Hague (Figure 9.1.2 à Figure 9.1.4).



Figure 9.1.2 *Entreposage sur lorry des emballages de transport (doc. Cogema)*



Figure 9.1.3 *Accostage de l'emballage sous une cellule de déchargement (doc. Cogema)*



Figure 9.1.4 *Cellule de déchargement et d'entreposage de colis primaires (doc. Cogema)*

9.1.2 Préparation des colis de stockage de déchets B

Les opérations de préparation des colis de stockage de déchets B sont constituées des étapes suivantes :

- le conteneur préfabriqué est acheminé depuis le magasin d'entreposage vers la ligne de conditionnement dans un poste de chargement des colis primaires. La mise en place des colis primaires dans le conteneur est réalisée à l'aide d'outillage de préhension spécifique à chaque colis primaire ;
- après mise en place du couvercle, le conteneur est ensuite fermé par coulage d'un mortier mis en oeuvre à l'aide d'un robot. Des dispositifs techniques permettent d'acheminer le coulis de mortier depuis l'unité de production et de contrôler le volume de mortier déposé ;
- les colis sont temporairement entreposés pour permettre un séchage du liant (24 heures). Ensuite, les conteneurs sont contrôlés (contrôle de non-contamination puis contrôle dimensionnel et de masse). Les colis déclarés non conformes au regard de critères d'acceptabilité, non définis à ce jour, sont transférés vers une cellule de traitement spécifique pour la récupération des colis primaires en vue de leur retour en cellule pour leur reconditionnement ;
- les colis conformes sont stockés dans une salle d'entreposage à minima 28 jours pour mûrissement du mortier de scellement. À l'issue de cette période, les conteneurs peuvent être transférés au poste de chargement des hottes pour leur transport dans les installations souterraines.

Ces opérations sont réalisées dans une série de cellules blindées représentées par le schéma de la Figure 9.1.5.

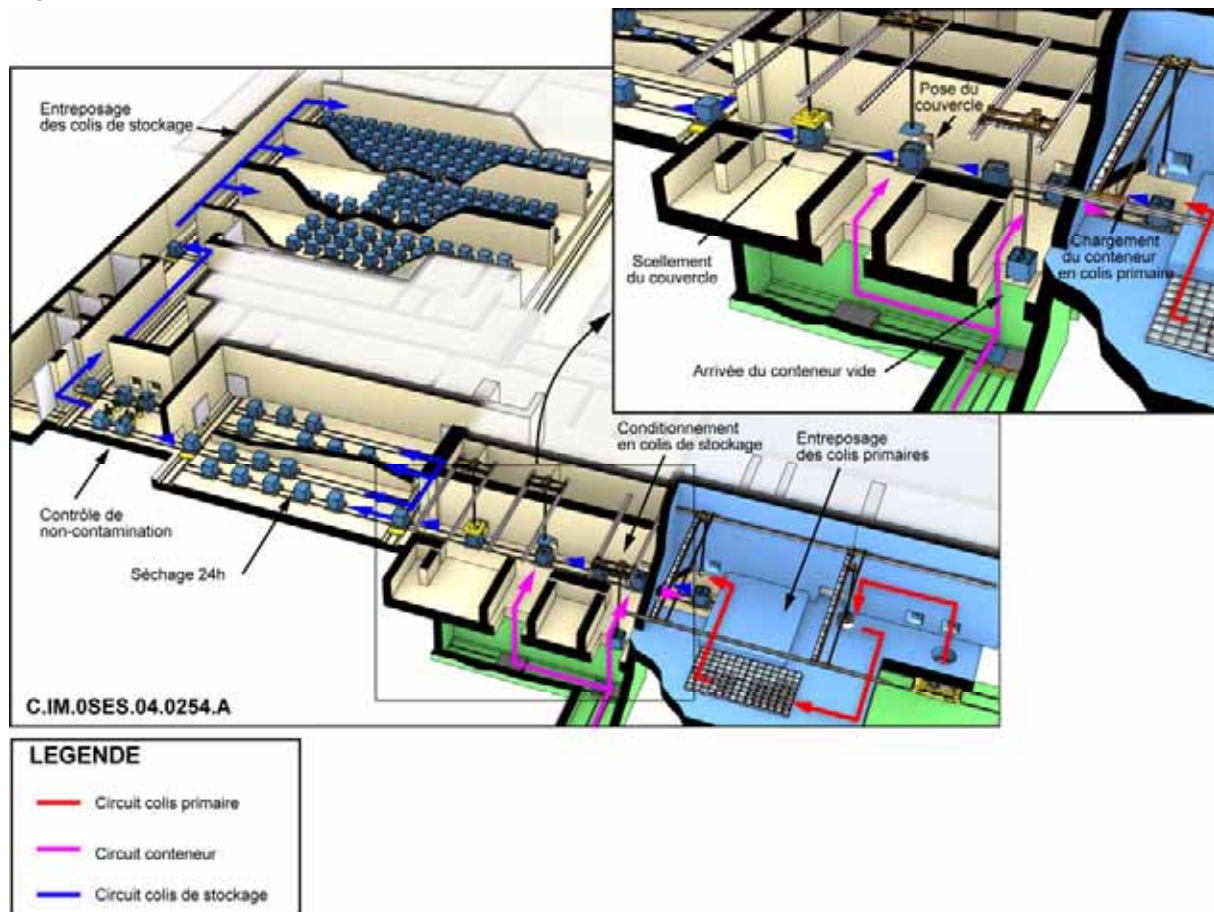


Figure 9.1.5 Cycle de préparation des colis de stockage de déchets B

La durée moyenne pour la fabrication d'un colis de stockage de déchets B correspondant aux opérations énumérées ci-dessus est estimée à environ 2 heures et demie. Sur cette base, deux lignes de conditionnement fonctionnant en continu seraient nécessaires pour produire en moyenne 6 colis de stockage par jour avec un maximum de 9 colis par jour suivant le type de colis à fabriquer.

9.1.3 Préparation des colis de stockage de déchets C

Les opérations de préparation des colis de stockage de déchets C sont constituées des étapes suivantes :

- Le surconteneur vide est acheminé depuis le magasin d'entreposage vers la ligne de conditionnement. Avant son entrée dans la cellule de conditionnement, le surconteneur et son couvercle subissent une opération de démagnétisation nécessaire au procédé de soudage par faisceau d'électrons.
- Les colis primaires sont ensuite mis en place dans le surconteneur dans un poste de chargement, à l'aide d'un outillage de préhension spécifique. Le couvercle est déposé, et l'ensemble est transféré vers l'enceinte de soudage.
- Le couvercle est soudé. Le procédé retenu pour la fermeture des colis C est le soudage par faisceau d'électrons (FE). Cette technologie nécessite la mise sous vide des éléments à assembler. Ce procédé a été décrit dans le chapitre relatif aux colis de stockage de déchets C (cf. section 4.2). La machine de soudage se compose d'une enceinte, d'un groupe de pompage et d'un canon de soudage. L'enceinte de réception des colis, d'environ 3 m³, est équipée dans sa partie inférieure d'un plateau tournant pour recevoir le colis qui est mis en rotation. La tête de l'enceinte possède une porte équipée de joints permettant l'introduction du conteneur par le haut et la fermeture étanche de l'enceinte. Le canon de soudage d'une puissance estimée à 45 kW et d'une vitesse d'avance de 10 à 15 centimètres par minute permet le soudage en une seule passe en 20 minutes environ.
- Il est ensuite procédé à des contrôles de la soudure et de non-contamination (décrit dans la section 4.2). Comme pour les colis B, les colis C déclarés non conformes sont transférés vers une cellule de traitement spécifique pour la récupération des colis primaires en vue de leur retour en cellule pour leur reconditionnement.
- Les colis conformes sont stockés dans une salle d'entreposage avant leur transfert vers les installations souterraines.

Ces opérations sont réalisées dans une série de cellules blindées représentées par le schéma de la Figure 9.1.6.

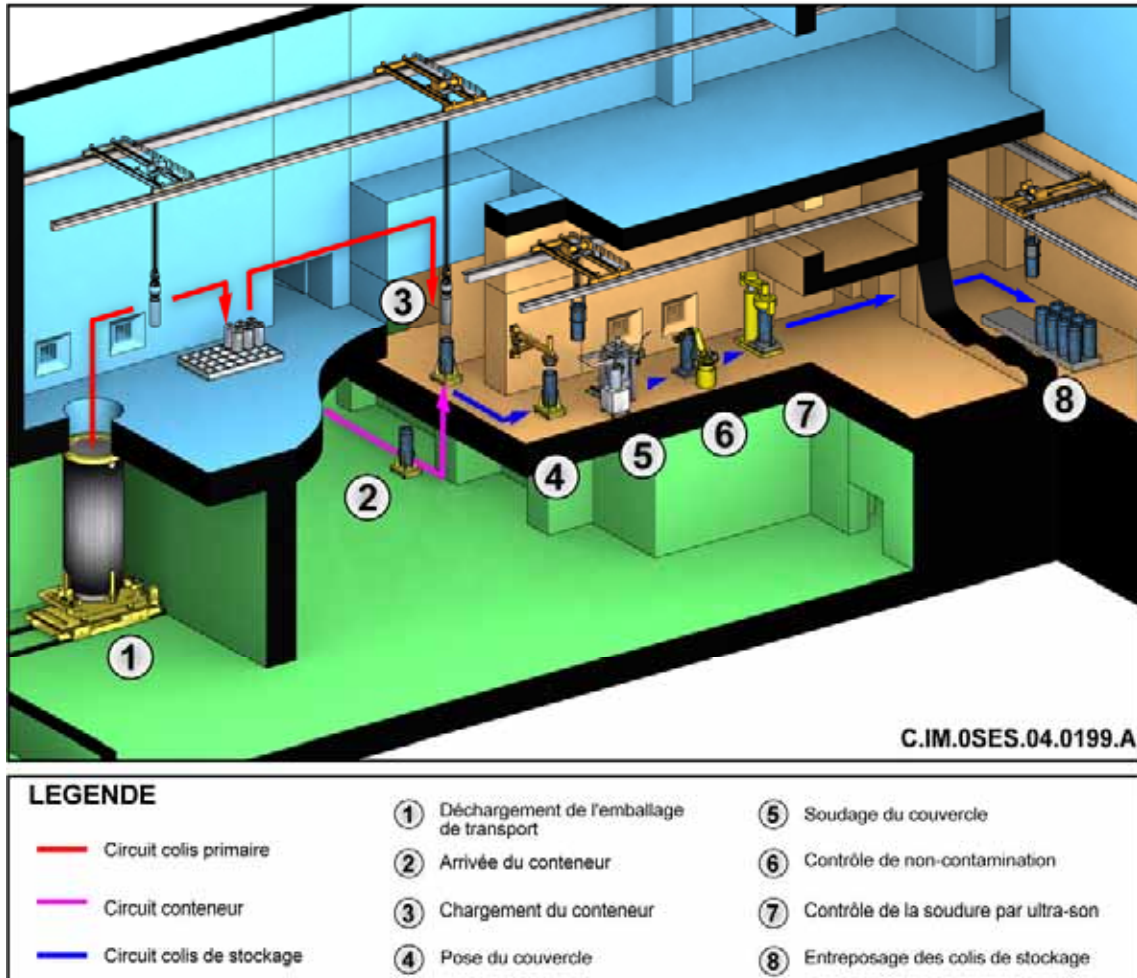


Figure 9.1.6 Cycle de préparation des colis de stockage de déchets C

La durée moyenne pour la fabrication d'un colis de stockage de déchet C est d'environ 3 heures. Sur cette base, une seule ligne de conditionnement fonctionnant en continu serait nécessaire pour produire en moyenne 5 colis de stockage par jour avec un maximum de 8 colis.

9.1.4 Préparation des colis de stockage de combustibles usés

Les opérations de préparation des colis de stockage de combustibles usés (UOX, MOX) sont constituées des étapes suivantes :

- acheminement des conteneurs vides et démagnétisation ;
- chargement des conteneurs en assemblages de combustibles usés et pose du couvercle ;
- soudage de la tôle de fermeture ;
- soudage du couvercle ;
- contrôle de non-contamination (décrit dans la section 4.3) ;
- contrôle de la soudure décrit (dans la section 4.3) ;
- entreposage des colis de stockage avant transfert dans les installations souterraines.

Ces opérations sont réalisées dans une série de cellules blindées représentées par le schéma de la Figure 9.1.7.

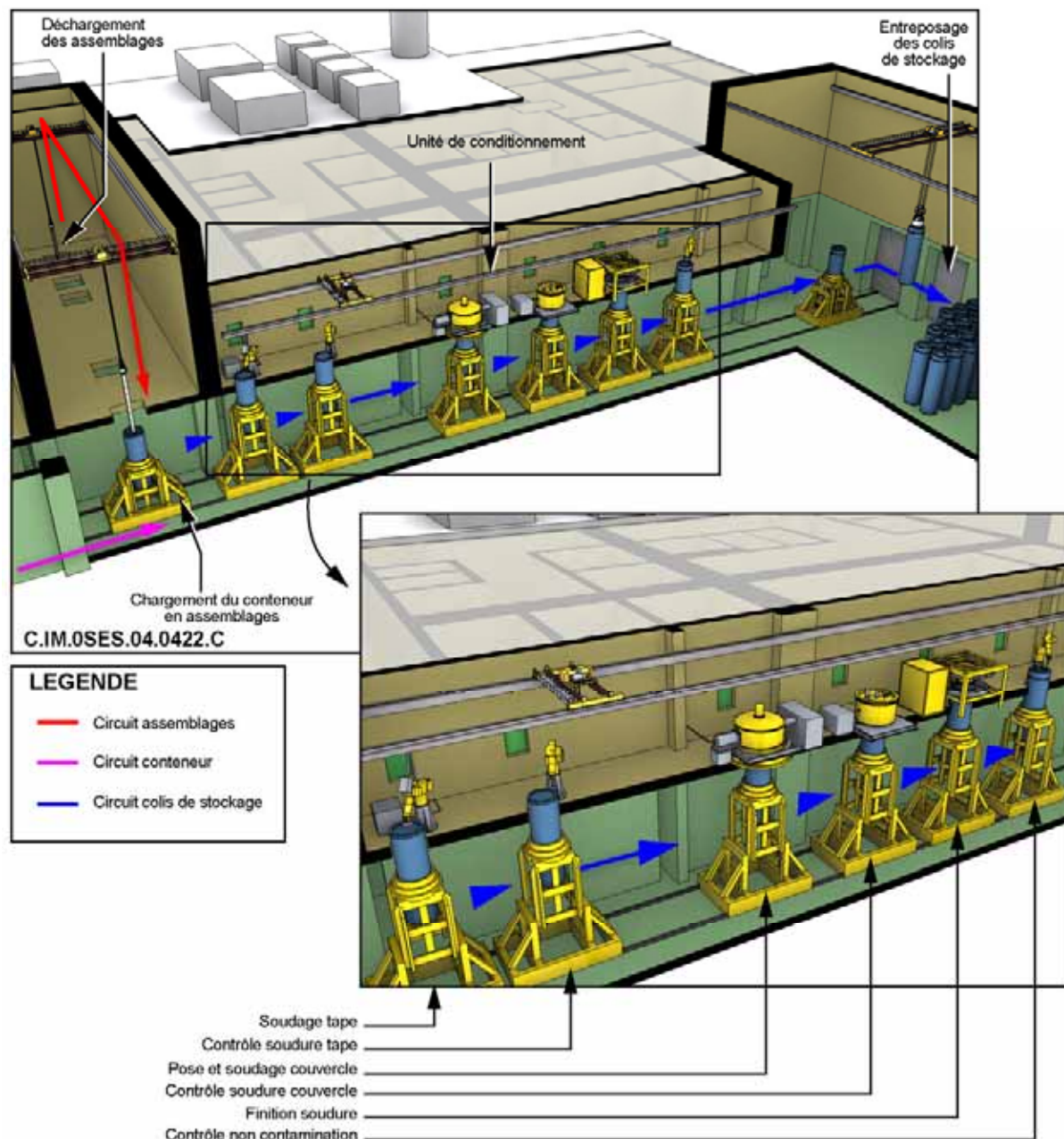


Figure 9.1.7 Cycle de préparation des colis de stockage de combustibles usés

Les principales opérations de préparation des colis de stockage des combustibles usés sont similaires à celles du colis de stockage des déchets C.

Néanmoins, des opérations supplémentaires sont nécessaires. En effet, la nécessité de réaliser le vide dans l'environnement de la soudure du couvercle conduit, préalablement à cette opération, à souder une « tape » en partie supérieure des logements afin de limiter le volume de la partie qui sera mise en dépression.

En outre, le poste de soudage par faisceau d'électrons diffère de celui envisagé pour les colis C. En effet, compte tenu de la grande taille du colis de stockage de combustibles usés, seuls la tête et son couvercle sont positionnés à l'intérieur de l'enceinte sous vide. Cette contrainte implique un chargement par le dessous (cf. Figure 9.1.8).

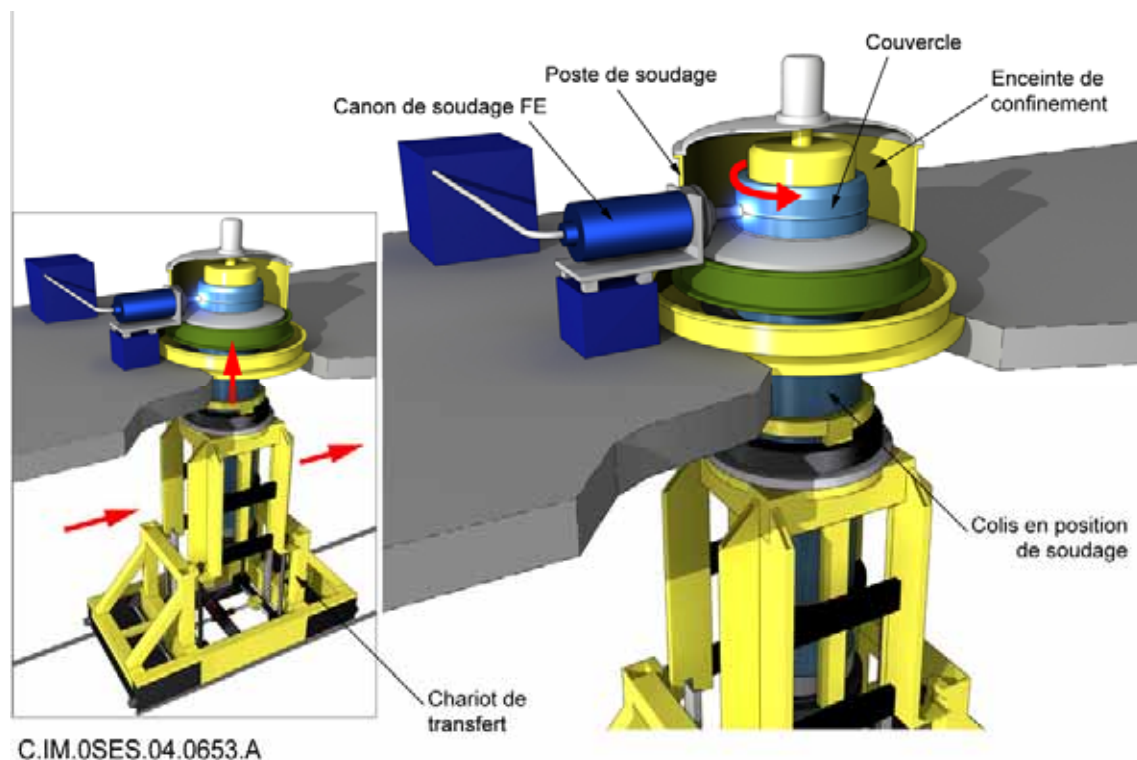


Figure 9.1.8 Poste de soudage du couvercle d'un colis de combustibles usés

Le conteneur est mis en rotation à partir d'un mécanisme situé sous la cellule de soudage. L'étanchéité entre le conteneur mis en rotation et l'enceinte de soudage est assurée par un joint tournant spécifique.

Le canon de soudage d'une puissance estimée à 50 kW, associée à une vitesse d'avance de 10 à 20 centimètres par minute, permet le soudage en une seule passe de 1 heure environ.

La durée moyenne pour la fabrication d'un colis de combustibles usés est d'environ 10 heures. Sur cette base, deux lignes de conditionnement fonctionnant en continu seraient nécessaires pour produire en moyenne 2 colis de stockage par jour avec un maximum de 3 colis.

9.2 Processus de transfert des colis de stockage depuis la surface jusqu'aux alvéoles de stockage

La présente section expose les moyens et les procédés de transfert des colis de stockage depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage [81]. L'ensemble des opérations présentées peut être inversé, pour remonter en surface des colis retirés du stockage, le cas échéant.

9.2.1 Principes généraux du transfert des colis de stockage

Le principe du transfert des colis de stockage entre les installations de surface et les alvéoles de stockage résulte principalement de considérations de radioprotection. Le débit d'équivalent de dose résiduel des colis de stockage (toutes catégories confondues : B, C, et CU) ne permet pas leur manipulation sans protection radiologique pour le personnel. Le principe retenu consiste donc à introduire les colis dans une hotte blindée dite de « protection radiologique » au niveau des installations de surface. Cette hotte est ensuite transférée jusqu'à l'entrée des alvéoles de stockage au niveau desquelles les colis de stockage sont extraits et mis à leur position définitive dans l'alvéole.

Le cycle de transfert des hottes de protection contenant les colis de stockage depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage est constitué des quatre étapes suivantes :

- chargement de la hotte en surface ;

- transfert de la hotte dans le puits ;
- transfert de la hotte en galerie ;
- accostage de la hotte sur la tête d'alvéole.

Le synoptique de la Figure 9.2.1 illustre les opérations principales nécessaires à la réalisation de ce cycle.

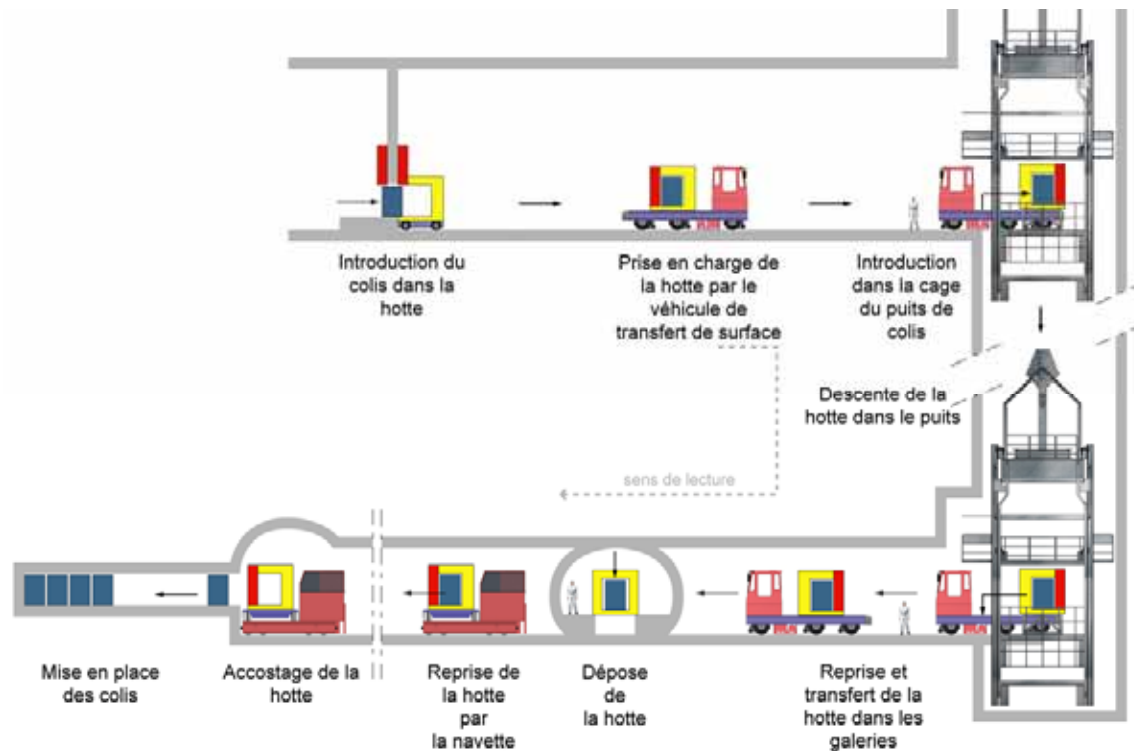


Figure 9.2.1 Synoptique général du transfert des colis de stockage jusqu'à l'alvéole

9.2.2 Les hottes de protection radiologique

9.2.2.1 Fonctions et définition des hottes de protection radiologique

Les hottes de protection radiologique utilisées pour le transfert des colis de stockage sont conçues pour ne contenir qu'un seul colis de stockage. Elles sont dimensionnées pour satisfaire deux objectifs :

- Les hottes de transfert des colis B, C et CU ont une fonction de protection radiologique qui contribue à limiter l'exposition du personnel en deçà des contraintes de dose annuelle fixées par l'Andra (5 mSv/an).
- La hotte doit également contribuer au maintien du confinement des radionucléides en cas de chute dans le puits de descente. La simulation dynamique d'un tel scénario montre que le niveau de décélération subi par la hotte peut être limité (voir chapitre 11).

Une hotte est constituée d'une embase de manutention surmontée d'une enceinte blindée. L'enceinte est elle-même équipée d'une porte blindée permettant le chargement et le déchargement latéral du colis. Les dimensions des embases des trois types de hotte sont proches pour permettre de standardiser leur manutention par le dessous.

Cependant, les différences de géométrie des trois types de colis de stockage (B, C et CU) ont conduit à adopter des hottes spécifiques pour chaque type. Les schémas de la Figure 9.2.2 illustrent ces trois types de hotte.

La Figure 9.2.3 illustre une hotte analogue envisagée pour le stockage de déchets transuraniens type « RH » (Remote handled) fortement irradiants dans les installations du WIPP (Waste Isolation Pilot Plant – USA).

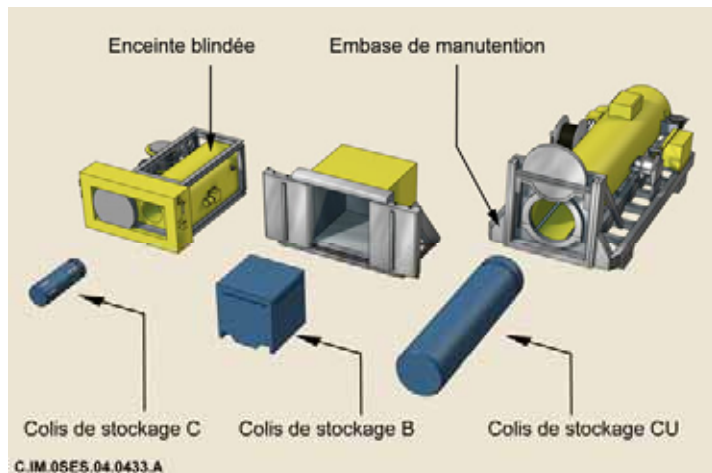


Figure 9.2.2 Hottes de transfert des colis B, C et combustibles usés



Figure 9.2.3 Hotte de transfert de colis de stockage (photo issue du WIPP)

9.2.2.2 Description des trois types de hotte

● La hotte pour déchets B

La hotte de protection radiologique pour les colis de stockage de déchets B, est constituée d'une embase, d'une enceinte blindée parallélépipédique et d'un système de portes à deux vantaux. Elle ne comporte aucune mécanique embarquée car les opérations de chargement et de déchargement sont assurées par un équipement distinct. Les parois des hottes sont conçues avec des matériaux adaptés aux types de rayonnements émis par les colis de déchet transportés (plomb ou acier pour les rayonnements γ , matériau neutrophage pour les neutrons), et si nécessaire un écran thermique pour la protection vis-à-vis du risque d'incendie.

L'existence de plusieurs types de colis de stockage de déchets B, en termes de dimensions, de masses et de débits d'équivalent de dose a conduit à définir plusieurs familles de hottes. Leurs masses en charge varient de 40 à 100 tonnes pour des colis de 7 à 25 tonnes. Leurs épaisseurs de protection biologique varient de 50 à 300 mm d'acier ou de matériau composite suivant le débit d'équivalent de dose des colis transportés.

● Les hottes pour déchets C et combustibles usés

Dans le cas des déchets C et des combustibles usés, l'enceinte blindée est cylindrique et la porte est du type « coulissante ». Dans les deux cas, la hotte est dotée d'une mécanique embarquée constituée d'un robot situé dans l'enceinte blindée. Il s'agit d'un robot pousseur à vérins dans le cas des déchets C et d'un robot aéroporteur à coussin d'air dans le cas des combustibles usés. Ce robot permet l'extraction du colis et sa mise en place dans l'alvéole.

L'enceinte blindée est constituée de parois en panneaux sandwich acier/PPB/acier. Le PPB (Plâtre Polyéthylène Boré), matériau neutrophage a été retenu au regard du rayonnement qui caractérise les déchets vitrifiés C et les combustibles usés. L'épaisseur totale des parois latérales du fond et de la porte est de l'ordre de 400 mm pour la hotte C et de l'ordre de 200 mm pour la hotte CU.

La masse en charge de la hotte C est d'environ 41 tonnes pour un colis de stockage de 2 tonnes.

La masse en charge de la hotte pour combustibles usés est d'environ 105 tonnes pour un colis de stockage de 43 tonnes.

9.2.3 Le transfert des colis dans le puits de transfert

Après chargement d'un colis dans une hotte, cette dernière est transférée vers les installations souterraines par le puits de transfert des colis. Le processus décrit ici résulte largement d'une transposition des pratiques industrielles en contexte minier mais également du retour d'expérience de l'exploitation du stockage souterrain du WIPP (USA) en fonction depuis 1999.

Les hottes sont transférées dans le puits par l'intermédiaire d'une cage entraînée par un système à câbles. L'ensemble du puits et de son équipement associé constitue un espace confiné par deux sas : l'un situé en partie supérieure au niveau de la recette surface et l'autre situé en partie inférieure au niveau de la recette fond. Lors du transfert d'une hotte, les sas sont fermés. Cet espace ainsi confiné est maintenu en dépression. Il communique par une galerie spécifique avec le système de filtration nucléaire qui pourrait si besoin être installé en tête du puits de retour d'air, afin de limiter les éventuelles conséquences radiologiques consécutives à un accident du type « chute de la hotte dans le puits » (voir chapitre 11).

9.2.3.1 Description de l'équipement du puits

● Justification de l'équipement envisagé

Les principales solutions techniquement envisageables pour la descente de la hotte dont le poids en charge peut atteindre 110 tonnes sont :

- une descenderie à 10 % dans laquelle circule un véhicule sur pneumatiques ;
- un puits équipé d'un système de treuil à moufle mobile¹³⁰ ;
- un puits équipé d'un système à friction de type poulie Koepe.

Les trois principes sont possibles. Cependant la solution « système à friction du type poulie Koepe », illustrée par la Figure 9.2.4, est considérée à ce stade des études comme solution de référence, car ce système, très largement éprouvé en contexte minier depuis un siècle de par le monde, est une technologie fiable.

Le tableau ci-dessous donne quelques chiffres de références comparables à la présente étude.

Tableau 9.2.1 Références de puits équipés du système « Poulie Koepe »

Localisation	Utilisation	profondeur (m)	charge suspendue (tonnes)	nombre de (câbles)	charge suspendue par câble (tonnes)	vitesse (m/s)
Suède	Extraction de minerai, mine de Kiruna	802	192	6	32	17
Pologne	Extraction minière, Pniowek	1 160	229	4	57	18
Allemagne	Projet de stockage de déchets nucléaires, Gorleben	870	214	8	27	5
Etats-Unis	Stockage de déchets nucléaires, WIPP	698	120	6	20	2,5
France	Etude	485	300	10	30	1

¹³⁰ Le moufle mobile permet de démultiplier l'effort exercé par le treuil

● Description de l'équipement et des systèmes de sécurité

Le système à friction « Koepe » est constitué d'une poulie motorisée autour de laquelle sont suspendus deux mobiles (la cage transportant la charge utile et le contrepoids) par l'intermédiaire de câbles de suspension. Pour la configuration envisagée, 10 câbles de 70 mm de diamètre seraient nécessaires. Des câbles d'équilibre, attelés au fond de la cage et au fond du contrepoids, complètent le dispositif. Une petite cage de secours indépendante permet d'assurer la sécurité du personnel affecté aux opérations de maintenance. Le schéma de la Figure 9.2.4 illustre ce principe.

La poulie Koepe est installée au sommet d'une tour d'une cinquantaine de mètres de haut. Elle est entraînée par des moteurs électriques à vitesse variable et équipée d'un système de freins à disque.

Le système est dimensionné pour permettre le transfert d'une charge de 110 tonnes à une vitesse de 1 m/s.

Le puits dispose en outre d'un système de ventilation indépendant. Il est relié aux installations du jour et du fond par des sas.

La Figure 9.2.5 montre la poulie Koepe dont est doté le puits de descente des colis de l'installation du WIPP (USA).

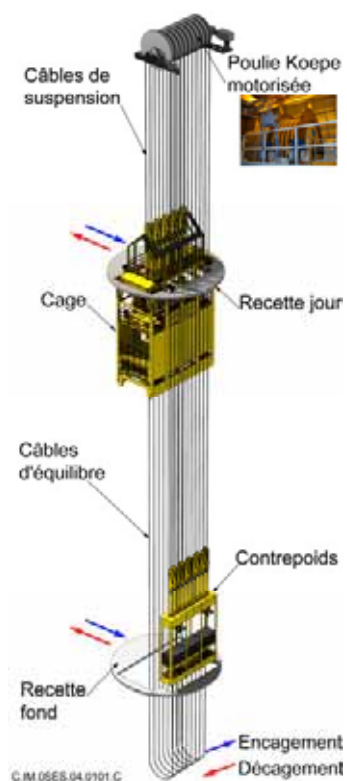


Figure 9.2.4 Principe du système à friction KOEPE



Figure 9.2.5 Poulie Koepe du puits de descente des colis du WIPP (USA)

La sécurité de l'équipement décrit ci-dessus est assurée par quatre dispositifs indépendants :

- Un système de freinage par freins à disque agit directement sur la poulie Koepe. Ces freins sont actionnés par deux circuits indépendants, pour assurer d'une part la fonction de frein de service statique et d'autre part la fonction de frein de sécurité dynamique.
- Un système anti-chute, indépendant du système précédent, permettant d'immobiliser la cage sur des câbles spécifiques suspendus depuis la superstructure de surface jusqu'au fond du puits.
- Deux systèmes de freinage de fin de course installés dans la tour et sous la recette fond permettent d'arrêter la cage en cas de dépassement de sa course normale. Ils agissent par déformation de profilés métalliques qui absorbent ainsi l'énergie cinétique de la cage.
- Enfin un système amortisseur de chute passif, installé en partie inférieure du puits (voir section 11.7), pourrait venir compléter ces dispositions. Un tel système trouve sa justification dans le cas très peu probable où aucune des trois premières mesures ne permettraient d'arrêter la course de la cage.

Les trois premiers systèmes correspondent à des systèmes fiables et éprouvés dans les installations minières depuis de nombreuses années. Par ailleurs, le système amortisseur de chute présente de nombreuses références industrielles relatives à des chocs de véhicules, de trains à grande vitesse ou d'impacts de missiles. Cependant les systèmes antichute et amortisseur de chute nécessitent des études complémentaires compte tenu de la masse transportée.

9.2.3.2 Principe du transfert surface/fond

Le fonctionnement de l'équipement du puits est entièrement automatique. Au moment de la descente d'une hotte, aucun personnel ne se trouve dans la cage, ni dans les sas surface et fond.

La mise en place d'une hotte dans la cage du puits en surface et son extraction au niveau des installations souterraines est réalisée par des véhicules similaires. Ces engins, montés sur pneus, sont du type auto élévateur (Figure 9.2.6).

Le véhicule soulève la hotte, la transfère du bâtiment d'entreposage vers le puits à travers un sas, et la dépose dans la cage sur des supports latéraux.

La hotte est ensuite descendue dans la cage à une vitesse nominale de 1 m/s. Le temps de descente au fond est de l'ordre de 10 minutes en tenant compte des temps d'accélération, de décélération et d'arrêt.

L'extraction de la hotte au fond est réalisée suivant le processus inverse à sa mise en place en surface à l'aide d'un véhicule de transport auto élévateur sur pneus du même type. Ce véhicule assure la reprise en charge de la hotte ainsi que son transfert dans les galeries jusqu'à proximité des alvéoles de stockage.

9.2.4 Le transfert des hottes dans les installations souterraines

Cette section décrit le procédé de transfert des hottes de protection dans les installations souterraines. Le processus décrit ici résulte largement d'une transposition des pratiques industrielles en contexte minier. Il vise à minimiser la dimension des galeries et des ouvrages de croisement ainsi qu'à découpler la fonction de transfert sur de grandes distances de celle de l'accostage de la hotte sur la tête d'alvéole (qui demande des équipements plus spécifiques).



Figure 9.2.6 Principe de l'encagement et déchargement de la hotte

9.2.4.1 Principe des opérations de transfert des hottes

Les opérations de transfert d'une hotte depuis la recette fond du puits de descente des colis jusqu'à l'accostage en tête de l'alvéole constituent la partie la plus spécifique du cycle de transfert des colis de stockage entre la surface et les installations souterraines. À ce stade des études, on a privilégié un cycle constitué de deux étapes.

La première étape consiste à transférer la hotte depuis la cage du puits de descente jusqu'à proximité immédiate des alvéoles de stockage au travers du réseau de galeries. Ce transfert est réalisé à l'aide d'un équipement désigné par le terme « *véhicule de transfert* » capable de transporter des charges lourdes sur de longues distances. Ce véhicule est similaire à celui utilisé en surface pour l'encagement de la hotte.

La deuxième étape est l'accostage de la hotte sur la tête d'alvéole. Cette opération est réalisée à l'aide d'un équipement spécifique utilisé sur de courtes distances. Il est désigné par le terme « *navette d'accostage* ».

Le passage de la première étape à la deuxième nécessite donc un transfert de charge entre le « véhicule de transfert » et la « navette d'accostage ». Le découplage des deux fonctions décrites ci-dessus et l'utilisation de deux engins différents présentent plusieurs avantages : la spécialisation de chaque engin permet notamment de réduire l'encombrement en section de la navette d'accostage et la longueur du véhicule de transport ; d'autre part, la mécanique nécessaire à l'accostage n'est pas inutilement intégrée et transportée sur une longue distance ; enfin, le véhicule de transport n'est pas immobilisé pendant la phase d'accostage et de déchargement de la hotte.

Il convient cependant de noter que le principe présenté ci-dessus ne constitue pas l'unique solution au problème posé. La pertinence d'une rupture de charge imposée par l'utilisation de deux véhicules pourrait éventuellement faire l'objet d'un réexamen.

9.2.4.2 Transfert des hottes en galeries

Le schéma de la Figure 9.2.7 illustre la conception du véhicule de transport des hottes.

Les études de faisabilité ont conduit à proposer quelques principes pour ce véhicule surbaissé de type auto-élévateur automoteur électrique sur pneumatiques.

Le caractère « surbaissé » permet de minimiser les dimensions extérieures de l'ensemble véhicule/hotte et contribue ainsi à la minimisation du rayon de giration et de la section des galeries. Le plateau support de charge peut être élevé ou abaissé pour les opérations de pose et dépose de la charge. Il est équipé de roues multi directionnelles à motorisation indépendante permettant d'obtenir un rayon de braquage très court.

L'énergie électrique est privilégiée par rapport au moteur diesel au regard des risques d'incendie inhérents à ce type de motorisation.



Figure 9.2.7 Véhicule de transfert d'une hotte de déchets B

Enfin, le principe des pneumatiques a été privilégié au rail. En effet, l'utilisation de véhicules sur pneumatiques évite la construction et la maintenance d'un réseau de voies ferrées. D'autre part, les véhicules sur pneumatiques permettent de s'inscrire plus facilement dans des virages à faible rayon de courbure que les véhicules sur rail.

Il est à noter que ce type de véhicule correspond à une technique existante largement éprouvée notamment en contexte nucléaire. De tels véhicules sont proposés par plusieurs constructeurs européens.

La Figure 9.2.8 montre un exemple de cette technologie utilisée depuis plusieurs années sur le site Cogema de La Hague.



Figure 9.2.8 Véhicule de transfert utilisé sur le site de la Hague (doc Cogema)

9.2.4.3 Accostage des hottes sur les têtes d'alvéoles

L'accostage des hottes sur les têtes d'alvéole est réalisé par un véhicule spécifique : la « navette d'accostage ». À chaque type de hotte (B, C et CU) correspond une navette spécifique. Les spécificités de ces trois navettes sont liées au processus d'accostage des trois modèles de hotte et aux mécanismes d'accostage associés. Leurs principes de conception sont similaires à ceux du véhicule de transport décrit précédemment.

L'accostage de la hotte B est réalisé dans le même sens que l'axe de translation de la navette. Après dépose par le véhicule de transport, la hotte est reprise par la navette, puis celle-ci circule dans la galerie d'accès à l'alvéole de stockage et vient s'accoster sur un guichet, équipé de portes métalliques, pratiqué dans la paroi du sas de radioprotection de la tête d'alvéole.

L'accostage de la hotte C est réalisé perpendiculairement à l'axe de translation de la navette. Comme dans le cas précédent, la hotte est reprise par la navette après dépose par le véhicule de transport. La navette circule dans la galerie d'accès qui dessert plusieurs alvéoles de stockage. Après l'arrêt au droit d'une tête d'alvéole, la hotte est translaturée latéralement puis accostée à l'operculaire de l'alvéole (cf. Figure 9.2.9).

L'accostage de la hotte de combustibles usés est réalisé après une rotation d'un quart de tour. En effet, la longueur de la hotte ne permet pas son transfert perpendiculairement à l'axe de la galerie contrairement au cas des déchets C. La navette est équipée d'un plateau tournant et d'un mécanisme de translation. Une fois la navette positionnée au droit d'une alvéole, le plateau tournant fait subir une rotation de 90° à la hotte et celle-ci est translaturée, puis accostée sur l'operculaire de l'alvéole.



Figure 9.2.9 Accostage de la hotte C par la navette sur la tête d'alvéole

9.3 Processus de mise en place des colis dans les alvéoles de stockage

La présente section est relative à l'exposé des moyens et des procédés de mise en place des colis dans les alvéoles de stockage [81]. Le processus peut être inversé, pour retirer les colis des alvéoles, le cas échéant.

Les différentes solutions techniques possibles pour chacune des configurations étudiées (déchets B, déchets C et combustibles usés) sont présentées et comparées. Le choix de la solution privilégiée à ce stade des études résulte de considérations de robustesse, de minimisation du gabarit des engins pénétrant dans les alvéoles et de réduction des vides résiduels après la mise en place des colis.

9.3.1 Principes généraux de la mise en place des colis en alvéoles de stockage

Les principes de conception retenus pour le processus et l'équipement de mise en alvéole des colis de stockage répondent à deux fonctions essentielles : la fonction de transfert du colis de stockage depuis la hotte de protection jusqu'à sa position de stockage dans l'alvéole et la fonction de protection radiologique du personnel.

Dans les trois configurations étudiées (déchets B, déchets C et combustibles usés), la fonction de transfert du colis nécessite qu'au préalable la hotte contenant le colis de stockage soit accostée sur la tête d'alvéole. Un engin unique assure alors l'extraction du colis et sa mise en place dans l'alvéole.

Dans le cas des déchets C et des combustibles usés, la configuration géométrique de l'alvéole (cylindre dont le diamètre est ajusté au gabarit du colis de stockage) permet d'intégrer cet engin dans l'enceinte blindée de la hotte de transfert. Il s'agit d'un robot relié à la hotte par un ombilical. Il est récupéré dans la hotte après la mise en place de chaque colis. Pour les déchets C, le système retenu est un robot pousseur autopropulsé à vérins de type pas à pas. Pour les combustibles usés le système retenu est un aéroporteur fonctionnant sur le principe du coussin d'air.

Dans le cas des déchets B, la taille de l'alvéole et le choix d'empiler les colis les uns sur les autres nécessitent un engin de grande taille qui ne peut être intégré dans la hotte. L'engin retenu est alors un chariot élévateur stationné en tête d'alvéole.

Dans les trois cas, la fonction de radioprotection du personnel pendant la mise en œuvre de l'ensemble du processus (aussi bien en conditions normales qu'en conditions de défaillance) est assurée par la hotte de protection et l'équipement fixe de la tête d'alvéole sur lequel la hotte est accostée.

9.3.2 Description de l'équipement et du processus de mise en place des colis de déchets B

9.3.2.1 Principes de conception

● Fonctionnalités recherchées

Les colis de stockage de déchets B sont caractérisés par une masse variant de 6 à 25 tonnes, un volume d'environ 4 à 10 m³ et un débit de dose au contact pouvant atteindre 5 600 mSv/h pour les plus irradiants.

La manutention de colis lourds, irradiants, empilés sur plusieurs hauteurs et plusieurs rangées dans une alvéole de grande dimension (250 mètres de longueur) nécessite un engin mobile téléopéré capable de déplacer la charge dans les trois dimensions de l'alvéole c'est-à-dire longitudinalement, latéralement et verticalement. Cet engin doit également être capable, lors de la dépose des colis, d'une précision compatible avec un jeu fonctionnel colis – paroi de l'alvéole de l'ordre décimétrique. Cet engin doit pouvoir réaliser une rotation de 180° pour passer de la position « face à la hotte » à la position « face à l'alvéole ».

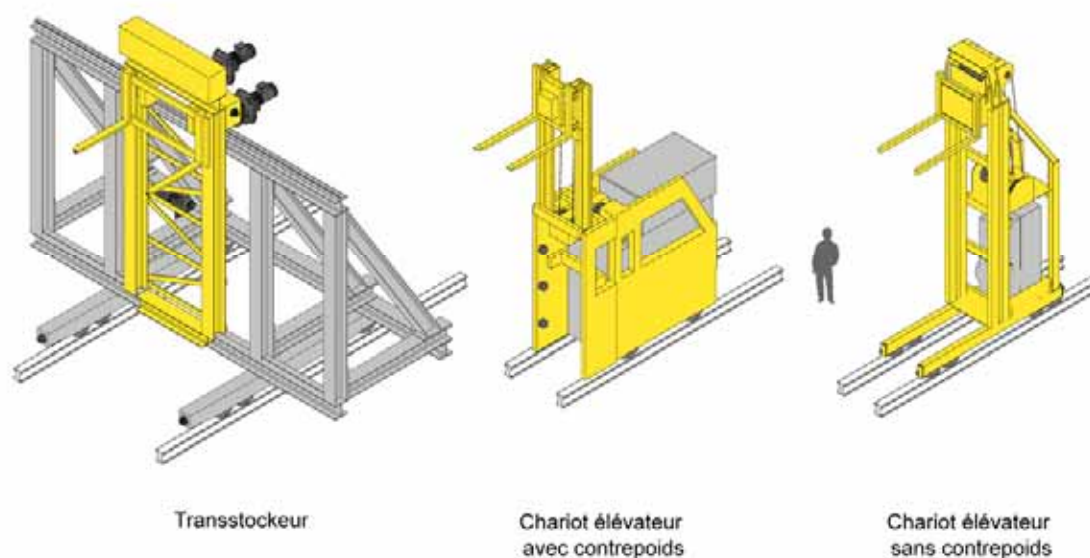
En outre, l'existence d'un engin mobile évoluant dans un environnement irradiant nécessite un sas de radioprotection pour assurer la protection radiologique du personnel lors de la sortie de l'engin pour maintenance ou intervention. Ce sas permet aussi de le récupérer lorsque l'alvéole est pleine.

Une première étude de faisabilité a conduit à l'identification de trois composantes essentielles pour répondre aux fonctionnalités décrites ci-dessus :

- un équipement mobile de manutention qui assure la fonction de transfert du colis de la hotte à sa position finale dans l'alvéole ;
- un sas de radioprotection qui assure la fonction de protection radiologique du personnel ;
- un équipement fixe situé dans le sas de radioprotection qui facilite les manœuvres de l'engin pour la fonction de transfert du colis.

● Choix de l'équipement de manutention des colis

Dans le cadre de l'étude, trois options ont été étudiées. Elles sont illustrées par la Figure 9.3.1.



C.IM.0SES.04.0577.A

Figure 9.3.1 Types d'équipement de manutention envisagés pour les colis B

La première option envisagée est un transstockeur. Cet engin est constitué d'une charpente verticale montée sur rails occupant toute la largeur de l'alvéole. Un système embarqué permet la translation latérale et l'élévation. Un tel équipement induit la réalisation d'un sas de grande dimension et une ouverture pleine section des portes de sas.

La deuxième option envisagée est un chariot élévateur de type traditionnel. Cet engin possède un contrepoids pour équilibrer la charge soutenue en « porte à faux » par des fourches. Ce contrepoids conduit à un encombrement important notamment en termes de longueur. Dans le cas des charges considérées (25 tonnes), la longueur d'un chariot traditionnel serait d'environ 6 m. Cette longueur nécessiterait un sas de grande dimension afin de permettre une rotation de 180° du chariot dans l'alvéole. La masse d'un tel engin serait d'environ trois fois la charge à soulever soit environ 75 tonnes pour les colis les plus lourds.

Enfin, la troisième option étudiée est un chariot élévateur sans contrepoids. Cet équipement est caractérisé par le fait que le centre de gravité de la charge reste à l'intérieur du polygone de sustentation formé par les roues. Le contrepoids n'est pas nécessaire et conduit donc à une longueur plus faible. Dans le cas des charges considérées la longueur d'un tel chariot est d'environ 4 m. Sa masse est du même ordre de grandeur que celle de la charge à soulever soit environ 25 tonnes.

La comparaison de ces trois options conduit à privilégier celle du chariot sans contrepoids désigné dans les paragraphes qui suivent par le terme « stockeur ». En effet, cet engin se caractérise par un encombrement significativement réduit par rapport aux autres solutions. Il permet de réduire le volume de la tête d'alvéole non utilisé pour le stockage. Il permet une évolution plus aisée lors des opérations d'extraction du colis de la hotte et de préparation à la mise en alvéole. Enfin, sa masse plus faible facilite son retour par des moyens de secours en cas de défaillance.

● Choix de l'équipement de radioprotection

Le sas de radioprotection est constitué de deux systèmes de porte ménageant un espace suffisant pour accueillir le stockeur. Une première option consiste à placer les portes aux deux extrémités de la galerie d'accès. Une autre option consiste à placer ces portes en tête d'alvéole de stockage.

La comparaison de ces deux options a conduit à privilégier celle du sas situé en tête d'alvéole. En effet, cette solution apporte une plus grande sûreté et souplesse d'exploitation. Elle permet notamment des opérations plus aisées de maintenance et de dépannage des équipements fixes et mobiles. Enfin, elle est équivalente à l'alternative considérée en termes de volume excavé car, dans les deux cas, un volume non utilisable pour le stockage est nécessaire en tête d'alvéole pour les manœuvres du stockeur.

La porte externe est équipée d'un guichet d'accostage de la hotte. La porte interne constituée de panneaux coulissants couvre la totalité de la largeur de l'alvéole. Entre les deux portes un équipement fixe permet d'assurer la rotation et la translation latérale du stockeur.

9.3.2.2 Description du stockeur

● Description générale

Une première étude de faisabilité du stockeur a permis d'évaluer l'ordre de grandeur de ses dimensions qui sont d'environ 2 mètres en largeur, 4 mètres en longueur et 6 mètres en hauteur. Sa masse est d'environ 25 à 30 tonnes. Son alimentation en énergie pourrait se faire au moyen de batteries embarquées.

Le principe de ce chariot stockeur est illustré par la Figure 9.3.2.

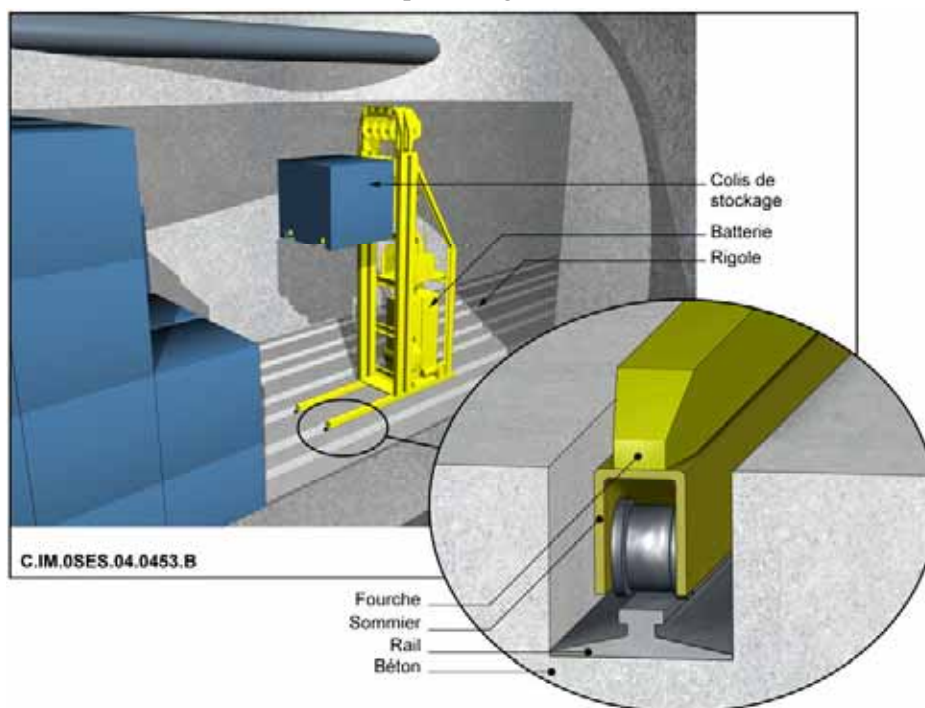


Figure 9.3.2 Chariot stockeur sans contrepoids

La structure principale du stockeur se compose de deux poutres métalliques équipées de roues. Ces deux poutres sont reliées entre elles par un mât sur lequel couissent verticalement deux fourches de levage. Le mât est positionné d'une façon telle que les fourches se trouvent à la verticale des poutres. Ainsi, lors de la manutention d'un colis, le centre de gravité de ce dernier est inscrit dans le polygone de sustentation formé par les roues, assurant ainsi la stabilité de l'ensemble.

Ce chariot permet un mouvement de translation pour son déplacement dans l'alvéole ainsi qu'un mouvement de levage pour la manipulation des colis. Le stockeur est monté sur des rails placés dans des rigoles pratiquées dans le radier sur toute la longueur de l'alvéole.

● Les performances de fonctionnement

Une question technologique importante pour le fonctionnement du stockeur est celle de ses performances en termes de positionnement des colis. En effet, la minimisation des jeux au sein de l'alvéole implique la dépose et l'empilement des colis avec une bonne précision (de l'ordre de quelques centimètres).

Pour répondre à cette question plusieurs technologies existent. À titre d'exemple, il est possible de mesurer la distance parcourue par le stockeur par un « distancemètre laser » couramment utilisé dans l'industrie pour des portées pouvant atteindre 500 mètres avec une précision de quelques millimètres.

La mise en œuvre de tels procédés est compatible avec des jeux fonctionnels colis/parois d'alvéole et colis/colis de l'ordre de 10 cm.

Enfin, au regard du risque de chute de colis, ce stockeur doit être doté de dispositifs de sécurité correspondant aux pratiques en matière de conception d'équipement nucléaire. Il est envisagé, à titre d'exemple, un dispositif permettant de freiner la vitesse de descente de la charge en cas de dysfonctionnement ou de rupture d'un élément de la chaîne cinématique de levage.

La Figure 9.3.3 montre un équipement de manutention analogue évoluant en téléopération dans un environnement irradiant sur le site de COVRA aux Pays-Bas.



Figure 9.3.3 Chariot de manutention
(photo COVRA)

9.3.2.3 Description des équipements fixes de l'alvéole

Les équipements fixes sont installés dans le sas en tête de l'alvéole (cf. Figure 9.3.4). Ils se composent :

- des portes blindées du sas ;
- d'un plancher mobile équipé d'un plateau tournant ;
- de rails en rigole constituant les voies de roulement ;
- de différentes utilités facilitant la maintenance des équipements.

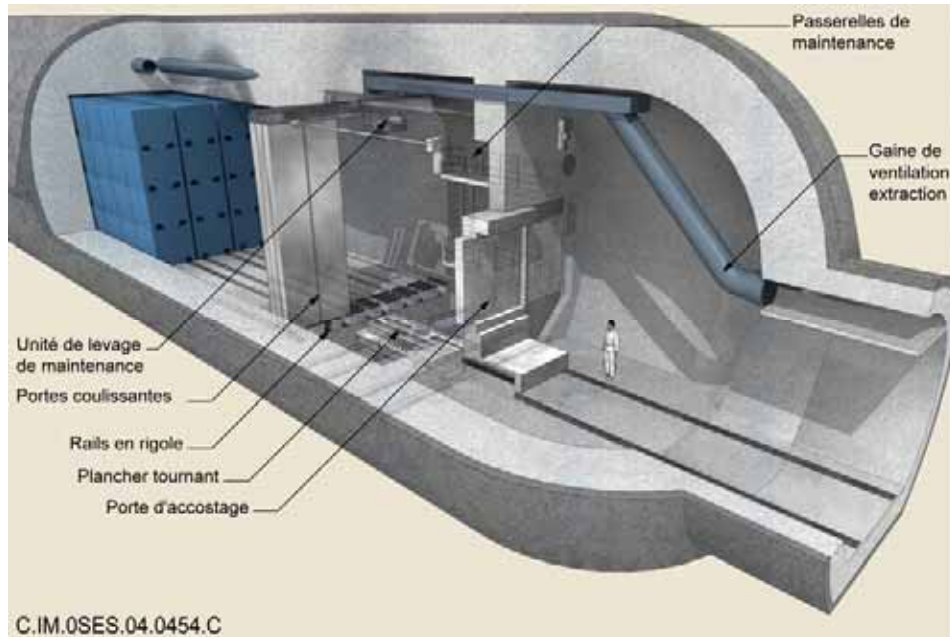


Figure 9.3.4 Equipements de l'alvéole

- **Les portes blindées du sas**

Le sas est équipé d'une « porte d'accostage » sur laquelle s'accoste la hotte de transfert et de « portes coulissantes » séparatives de la partie irradiante de l'alvéole contenant les colis.

La « porte d'accostage » (porte guichet) est constituée de deux vantaux motorisés coulissants en acier d'environ 300 mm d'épaisseur. Les « portes coulissantes » sont constituées de panneaux coulissants (plaques d'acier d'environ 300mm d'épaisseur) sur toute la hauteur de l'alvéole. Ces panneaux assurent également le passage d'air pour la ventilation de la chambre de stockage. A ce stade des études, la conception de ces portes n'a pas été étudiée en détail. Cependant, des portes de grandes dimensions (environ 6 à 7 mètres de hauteur et d'une trentaine de tonnes) existent dans des installations COGEMA sur le site de La Hague.

- **Plancher mobile avec plateau tournant**

Le plancher mobile porte le chariot stockeur. Grâce à un mouvement de rotation et un déplacement latéral, il permet au chariot stockeur d'être positionné en face de la hotte pour l'extraction du colis ou en face d'une des rangées de colis pour l'opération de transfert dans la chambre de stockage. Il se déplace perpendiculairement à la chambre de stockage sur des rails fixés au sol.

- **Les voies de roulement**

Les voies de roulement sont constituées de rails métalliques. Ce système a été préféré à un système sur pneus car il est caractérisé par un faible encombrement en bonne adéquation avec les dimensions des rigoles.

9.3.2.4 Description du processus de mise en alvéole

Le cycle de mise en stockage d'un colis B (illustré par le synoptique de la Figure 9.3.5) se décompose en quatre étapes.

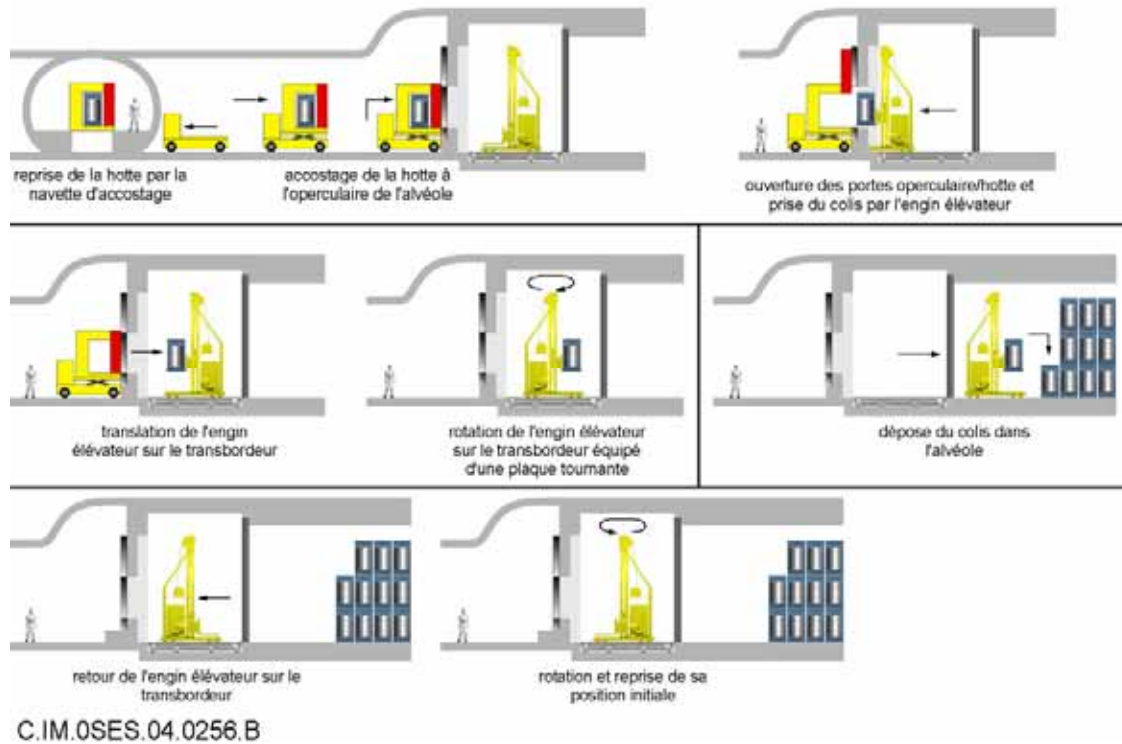


Figure 9.3.5 Synoptique de mise en alvéole des colis B

Dans une première étape, la hotte est accostée par la navette sur la porte guichet du sas de l'alvéole. Le stockeur peut alors extraire le colis de stockage.

Dans une deuxième étape, après fermeture du guichet d'accostage, le plancher mobile fait subir au stockeur une rotation de 180° et le translate face à la rangée de stockage sélectionnée.

Dans une troisième étape, 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 l'altitude correspondant à son niveau de dépose qui peut atteindre 4,50 m. Le stockeur s'avance à très petite vitesse et positionne le colis au-dessus du plan de pose constitué par le dessus du colis inférieur. Le colis est ensuite déposé à très petite vitesse. Les opérations de mise en place des colis sont illustrées par les Figure 9.3.6 et Figure 9.3.7.

Enfin, dans une dernière étape, le stockeur fait marche arrière et revient dans le sas dont les portes coulissantes sont refermées.

Le temps pour réaliser un cycle complet de mise en place d'un colis sur une distance d'environ 120 mètres est estimé à environ 2 heures depuis l'extraction du colis de la hotte jusqu'au retour du stockeur à vide dans le sas.

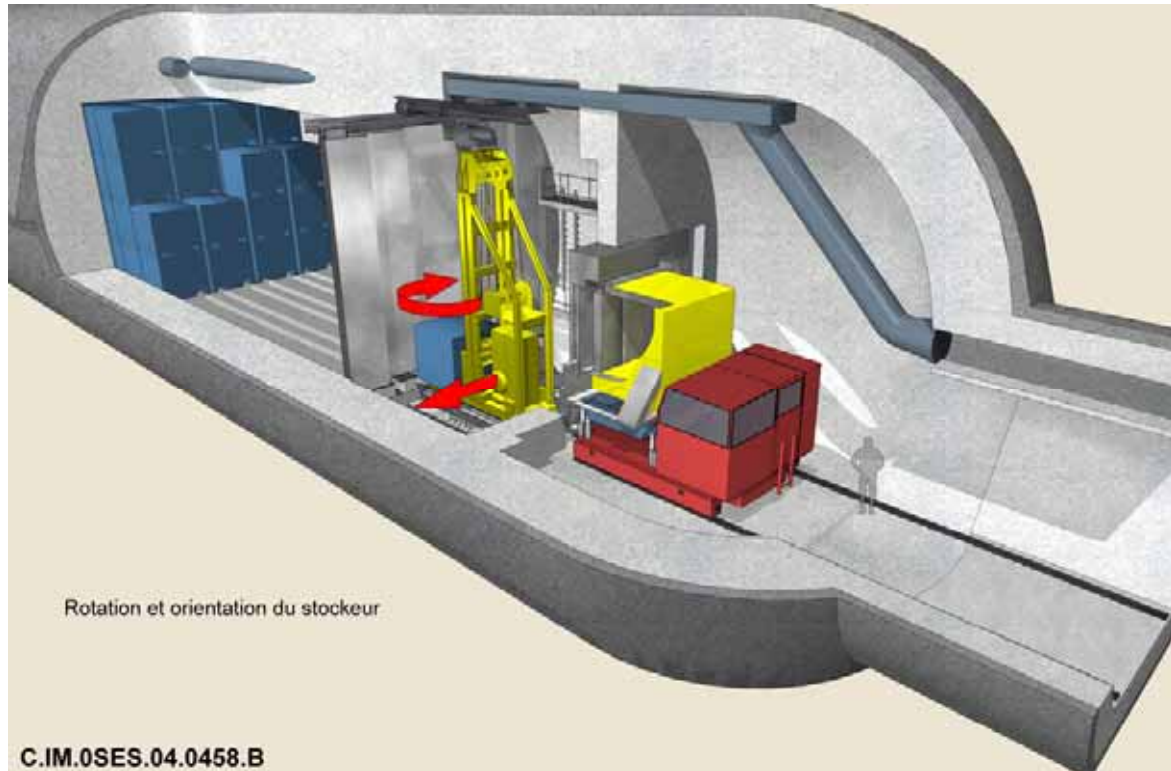


Figure 9.3.6 *Rotation et translation du stockeur dans le sas*

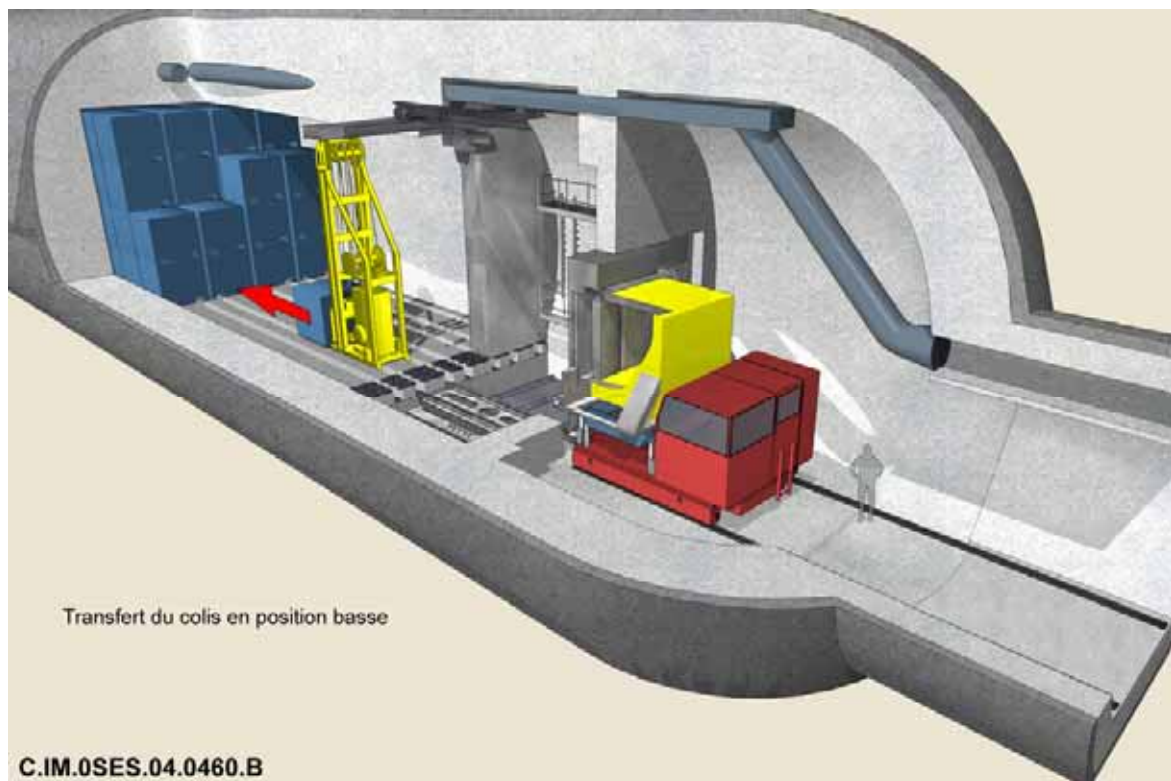


Figure 9.3.7 *Transfert du colis en position basse*

9.3.2.5 Une solution analogue étudiée à l'étranger

La photo de la Figure 9.3.8 illustre la solution adoptée en Allemagne dans les futures installations « Konrad » pour le stockage de déchets de type B peu irradiants [81]. L'engin est un chariot élévateur à contrepoids d'une capacité d'environ 20 tonnes, articulé pour prendre des virages courts. Il est doté d'une cabine blindée pour assurer la protection radiologique d'un opérateur embarqué.



Figure 9.3.8 Chariot élévateur à contrepoids (photo DBE)

9.3.3 Description de l'équipement et du processus de mise en place des colis de stockage de déchets C

9.3.3.1 Principes conception

- **Fonctionnalités recherchées**

Les colis de stockage de déchets C ont une masse d'environ 2 tonnes. Les colis type C1 à C4 sont caractérisés par un diamètre d'environ 0,60 m et une longueur d'environ 1,60 m. Les colis de type C0 sont caractérisés par un diamètre de 0,65 m et une longueur d'environ 1,30 m.

La mise en alvéole de colis irradiants cylindriques dans une alvéole horizontale de section circulaire nécessite un engin télé opéré capable d'être contenu dans la hotte blindée et de transférer le colis jusqu'à sa position finale avec un jeu fonctionnel colis/alvéole aussi petit que possible.

● Choix du principe de manutention des colis

Trois principes, illustrés par la Figure 9.3.9, ont été identifiés pour le transfert du colis de stockage :

- un robot aéroporteur utilisant le principe du coussin d'air ;
- un robot porteur autopropulsé ;
- un robot pousseur autopropulsé.

Le principe du « coussin d'air » sur support circulaire a fait l'objet de deux essais de faisabilité concluants. L'un a été réalisé par l'Andra (cas des combustibles usés de type CU1) et l'autre par l'agence suédoise SKB (cas d'un super-conteneur). Cependant, ces tests ont été réalisés avec une charge dont le diamètre est trop significativement supérieur (1,80 m et 1,25 m) à celui des colis de stockage C (0,60 m) pour qu'ils soient considérés comme facilement transposables. Le diamètre du colis C est en effet trop petit pour permettre l'utilisation de cellules « coussin d'air » standard. L'épaisseur de la structure porteuse des coussins d'air (environ 5 cm) impose un jeu fonctionnel relativement important par rapport au diamètre de l'alvéole (0,60 m).

Le principe associé au robot porteur consiste à soulever en porte à faux le colis de stockage par un robot autopropulsé. Ce robot est doté d'un contrepoids pour équilibrer la masse du colis. L'ensemble « colis-robot » constitue alors un bloc rigide dont la longueur nécessiterait un jeu important entre le colis et le chemisage. Le principe du porte à faux nécessitant une compensation par le poids du robot conduirait à un équipement d'assez grande longueur. Cet élément engendrerait par voie de conséquence une augmentation du gabarit et du poids de la hotte de protection.

Le principe du robot pousseur à vérins de type pas à pas consiste à pousser le colis par simple glissement sur le chemisage de l'alvéole. La poussée est exercée par un vérin hydraulique axial. La reprise d'effort est réalisée par des vérins radiaux qui s'appuient sur le chemisage. L'avance du robot est assurée par rétractation du vérin de poussée.

A ce stade des études, l'option de poussage par vérin a été préférée aux autres options. Ce principe de poussée par glissement bénéficie du retour d'expérience de deux essais réalisés, l'un par l'ONDRAF et l'autre par l'Andra. Ces tests ont montré que le point clef réside dans la nature du contact entre le colis et le chemisage. En particulier, les contacts du type « métal sur métal » sont à proscrire. L'utilisation d'acier inox constitue notamment un élément de nature à engendrer un grippage du système comme l'a montré l'essai conduit par l'ONDRAF.

La prise en compte de cette difficulté a conduit à envisager l'utilisation de patins de glissement en céramique intégrés sur le colis.

9.3.3.2 Description de l'équipement de mise en stockage des colis C

L'équipement étudié conformément au principe décrit ci-avant est constitué de trois parties : un robot mobile, un équipement fixe monté sur le châssis de la hotte de protection et un équipement fixe installé en tête d'alvéole.

Le robot est relié à l'équipement fixe de la hotte par l'intermédiaire d'un ombilical. L'équipement fixe de la tête d'alvéole contribue avec la hotte à la protection radiologique du personnel.

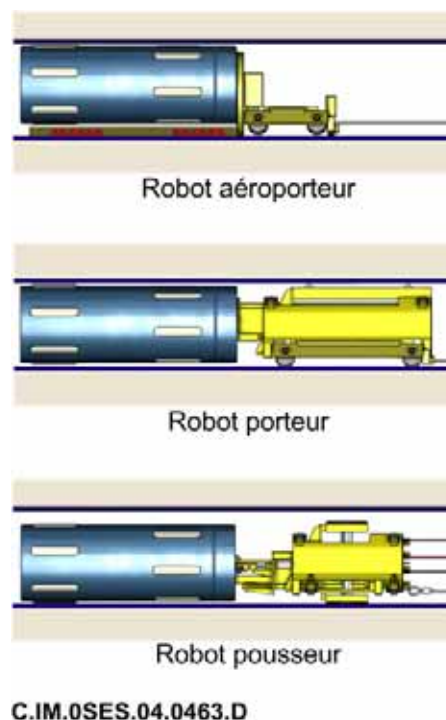


Figure 9.3.9 Illustration des principes de manutention envisagés

- **Le robot pousseur**

Le robot pousseur illustré par la Figure 9.3.10 est un appareil entièrement hydraulique. Le choix de l'hydraulique est essentiellement lié au fait que cette technologie autorise la conception d'équipements de petite dimension et de forte puissance. Cet aspect est bien adapté aux contraintes d'encombrement qui caractérisent l'environnement du processus.

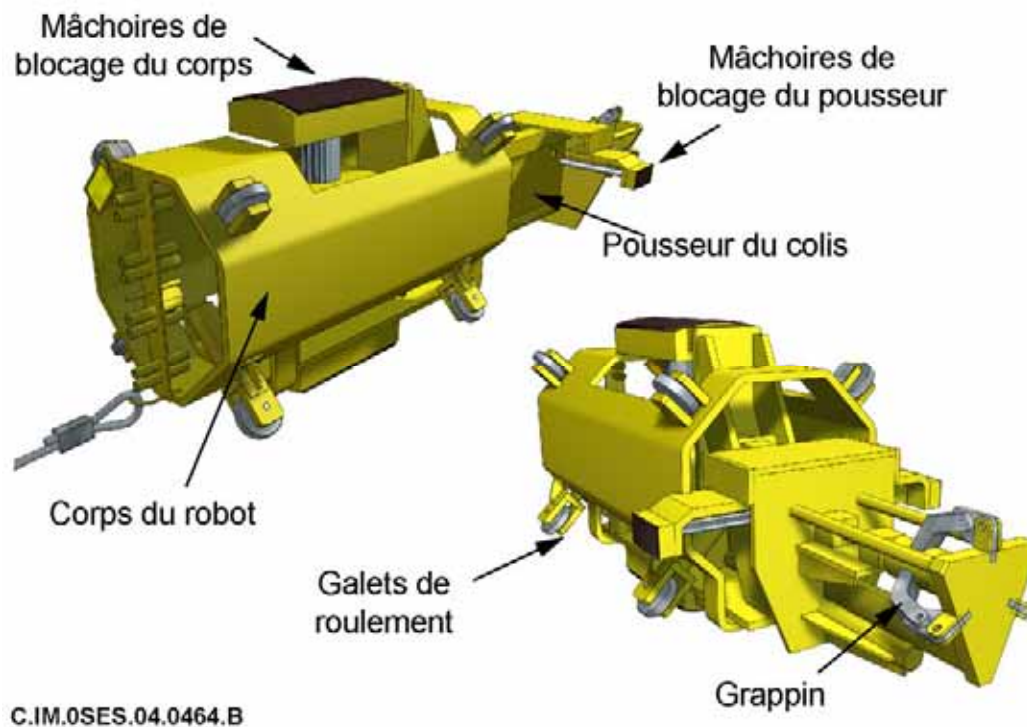


Figure 9.3.10 Robot pousseur pour colis C

Ce robot est constitué d'un cadre équipé de galets de roulement et d'un ensemble de vérins hydrauliques. Une première étude préliminaire a permis d'évaluer l'ordre de grandeur de ses dimensions qui sont d'environ 1,30 m de longueur et 0,55 m de diamètre.

Le robot assure deux fonctions réalisées de façon non simultanée : la poussée du colis et la translation du corps du robot. Ces deux fonctions sont assurées par deux organes principaux actionnés par des vérins : un pousseur axial et des mâchoires latérales. Deux mâchoires latérales servent au blocage du corps du robot et deux autres au blocage du pousseur axial. Le vérin longitudinal a pour fonction de pousser le colis. Pendant la poussée, le corps du robot est maintenu en position fixe grâce aux mâchoires latérales qui sont bloquées sur la paroi du chemisage. Le déblocage de ces mâchoires et le blocage des mâchoires du vérin pousseur autorisent alors la translation du corps du robot par rétractation du vérin longitudinal.

La cinématique de fonctionnement du robot pousseur est illustrée par la Figure 9.3.11.

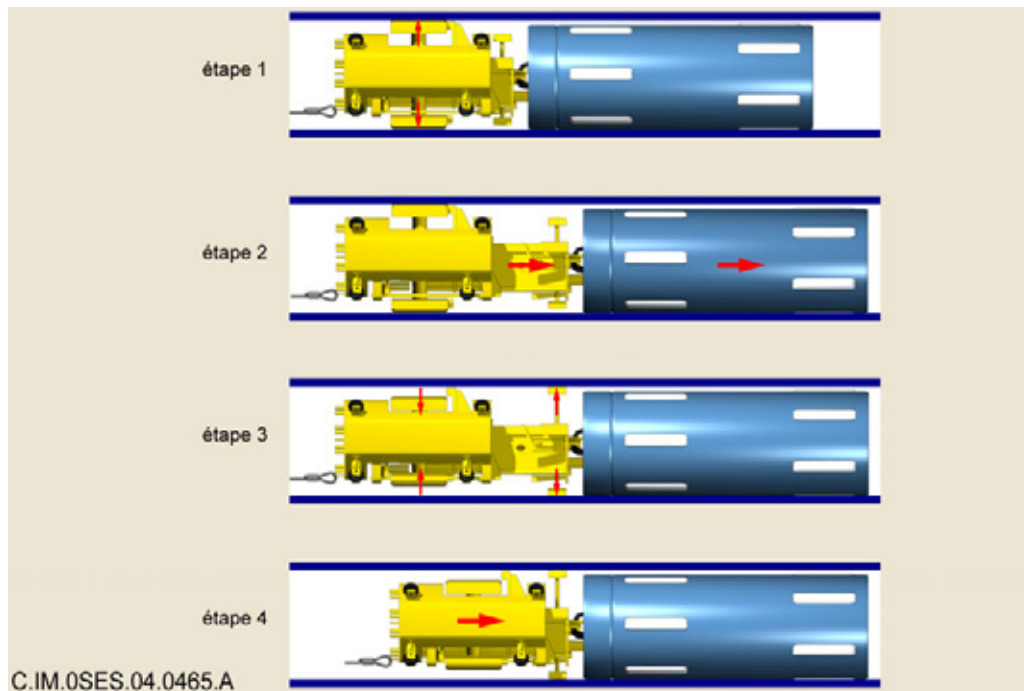


Figure 9.3.11 Illustration du principe de fonctionnement du robot pousseur

Un grappin situé en tête du robot peut permettre le retrait des colis.

- **Les équipements fixes solidaires de la hotte**

Les équipements fixes solidaires de la hotte sont constitués d'un treuil de rappel et d'une centrale hydraulique qui alimente le robot en eau déminéralisée pour le fonctionnement des vérins. Le treuil de rappel permet de ramener le robot en cas de défaillance. Cet équipement est relié au robot par un câble et des flexibles hydrauliques.

L'enceinte blindée est équipée d'un fourreau « mobile » contenant le colis et le pousseur. Ce fourreau peut être translaté sur environ 80 cm de façon à assurer une continuité physique avec le chemisage de l'alvéole qui est lui-même relié à l'operculaire implanté en tête de l'alvéole de stockage.

- **Les équipements fixes solidaires de la tête d'alvéole**

La tête d'une alvéole de stockage est constituée d'un operculaire lui-même composé d'une partie fixe relié au chemisage de l'alvéole et d'une porte coulissante manœuvrée par la porte de la hotte lorsque celle-ci est accostée. Cet operculaire assure la protection radiologique de l'alvéole, ainsi qu'une protection complémentaire lorsque la hotte est accostée. Cette protection, assurée par une épaisseur de matériaux composite acier/PPB, est semblable à la conception des parois de la hotte.

9.3.3.3 Description du processus de mise en alvéole

Un cycle de mise en stockage d'un colis C se décompose en trois étapes.

Dans une première étape, la hotte est accostée sur l'operculaire de la tête d'alvéole (cf. Figure 9.3.12). Les portes de la hotte et de l'operculaire sont alors mécaniquement accouplées. La porte de la hotte est motrice et entraîne celle de l'operculaire

Dans une deuxième étape, le robot actionné selon une logique d'avancement « pas à pas » transfère le colis de stockage à sa position finale dans l'alvéole (cf. Figure 9.3.13).

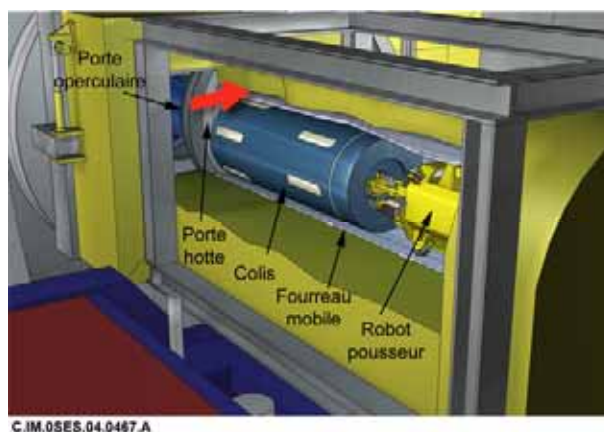
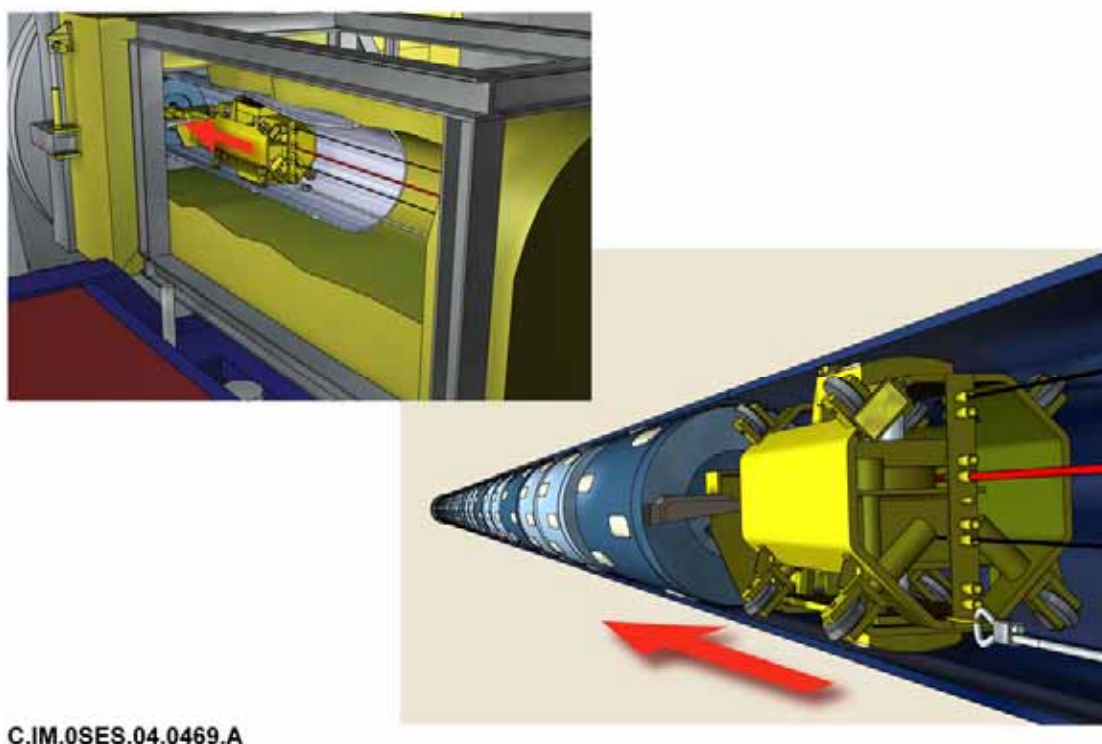


Figure 9.3.12 Hotte accostée sur la tête d'alvéole



C.IM.0SES.04.0469.A

Figure 9.3.13 Extraction de la hotte et mise en place du colis dans l'alvéole

Enfin, dans une dernière étape, le robot est ramené dans la hotte à l'aide du treuil de rappel implanté sur l'embase extérieure de la hotte. Les portes de l'operculaire et de la hotte sont alors refermées.

Le temps pour réaliser un cycle complet de mise en place d'un colis sur une distance d'environ 20 mètres est estimé à environ 2 heures.

9.3.3.4 Démonstration de la validité du principe retenu par un essai en atelier

Le processus de mise en place des colis C décrit ci-dessus fait l'objet de deux tests de validation à l'échelle 1.

L'objectif du premier test est de valider le principe des patins de glissement en céramique et de confirmer leur bonne adéquation avec le besoin. Ces essais, dont la plus grande part a déjà été réalisée, montrent l'intérêt de tels patins pour réduire le coefficient de frottement entre le colis de stockage et le chemisage de l'alvéole (voir section 4.2.)

L'objectif du deuxième test est de valider le principe de mise en alvéole par un robot pousseur. Ce test est réalisé dans le cadre du projet européen ESDRED coordonné par l'Andra.

Le test de validation du principe du robot pousseur à vérins met en œuvre un tube d'une vingtaine de mètres simulant le chemisage de l'alvéole, un colis factice équipé de patins, de même masse et dimensions qu'un colis réel et enfin un robot prototype. Des défauts géométriques et des obstacles sur le tube sont créés pour valider le bon fonctionnement du processus de transfert du colis présenté.

9.3.3.5 Une solution analogue mise en œuvre à l'étranger

Dans l'installation de stockage du WIPP (Waste Isolation Pilot Plant - USA) il est envisagé de stocker des déchets fortement irradiants du type « remote handled » (RH) dans une configuration comparable à celle envisagée par l'Andra. En effet, les colis de stockage de ces déchets sont similaires en termes de taille et présentent un niveau d'irradiation nécessitant une hotte de protection. D'autre part, l'alvéole de stockage est un tunnel court horizontal de faible diamètre. L'équipement envisagé par l'US DOE, responsable de ce stockage, consiste en une hotte accostée sur la tête d'alvéole et d'un pousseur hydraulique installé dans l'axe de la hotte (Figure 9.3.14).



Figure 9.3.14 Hotte équipée d'un pousseur hydraulique pour la mise en place de déchets de type RH dans des alvéoles horizontales de l'installation du WIPP

9.3.4 Description de l'équipement et du processus de mise en place des colis de stockage de combustibles usés

Cette section présente la justification du choix de deux principes différents pour la mise en stockage de colis à quatre assemblages (type CU1 ; diamètre d'environ 1,25 m) et de colis à un assemblage (type CU2 ; diamètre d'environ 0,60 m). Le principe privilégié pour les colis de type CU2 est similaire à celui présenté pour les colis C. Il est donc simplement rappelé et ne fait l'objet d'aucune description spécifique. Par ailleurs, le principe retenu pour les combustibles usés de type CU3 est identique à celui adopté pour les colis C.

9.3.4.1 Justification du principe retenu

● Fonctionnalités recherchées

Les colis de stockage concernés sont de deux types. Les colis CU1 sont caractérisés par une masse d'environ 43 tonnes et une longueur d'environ 5,40 mètres. Les colis CU2 sont caractérisés par une masse d'environ 10 tonnes et une longueur d'environ 4,60 mètres.

La mise en alvéole de ces colis de stockage de forte masse et de grandes dimensions dans une alvéole horizontale de section circulaire nécessite, comme pour les colis C, un engin téléopéré capable d'être contenu dans la hotte blindée et de transférer le colis jusqu'à sa position finale avec un jeu fonctionnel colis – alvéole aussi petit que possible.

● Choix du principe de manutention des colis

De même que pour la mise en place des colis de déchets C, trois principes ont été identifiés pour le transfert du colis de stockage (cf. Figure 9.3.15):

- transfert par un robot pousseur autopropulsé à vérins avec glissement du colis (principe similaire à celui retenu pour les colis C) ;
- transfert par un robot autopropulsé avec roulement du colis nécessitant l'incorporation de roues dans la structure du conteneur ;
- transfert du colis par un robot aéroporteur utilisant le principe du coussin d'air.

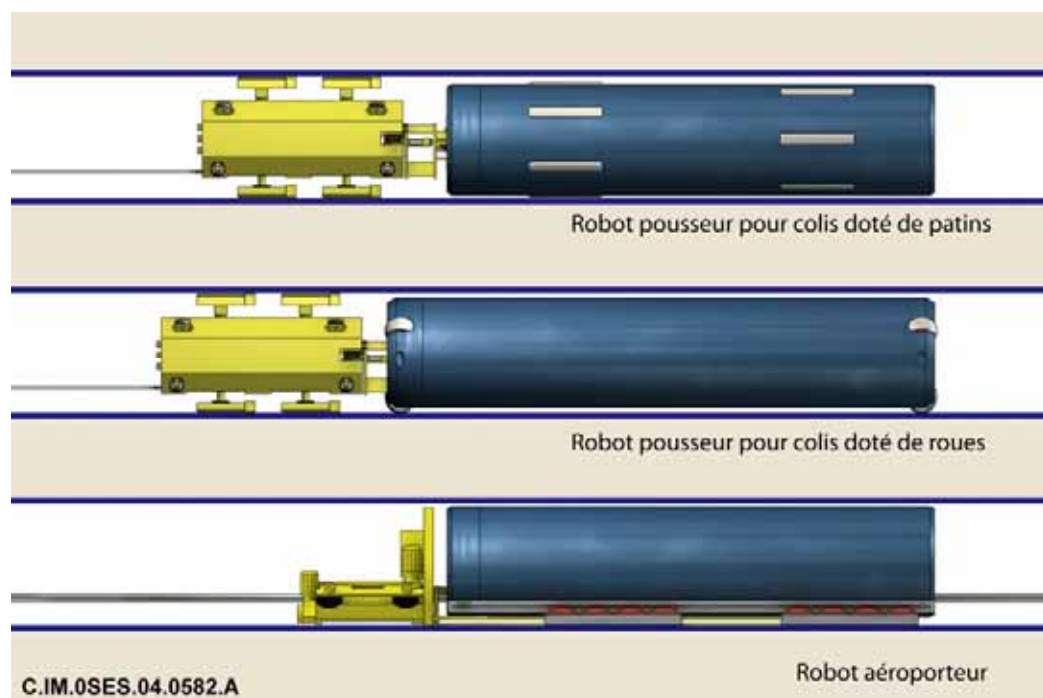


Figure 9.3.15 Les principes de manutention envisagés pour les combustibles usés

Dans le cas du colis CU1, le principe du coussin d'air a été préféré aux deux alternatives envisagées. En effet, la masse du colis CU1 (43 t) est peu compatible avec le principe de la poussée par glissement qui nécessiterait le développement d'un effort très important. L'option consistant à incorporer des galets dans la structure du conteneur compliquerait le processus de fabrication de ce dernier et augmenterait la longueur du colis ainsi que son poids de façon significative.

Le principe du coussin d'air a fait l'objet d'un essai représentatif par l'agence suédoise SKB à l'aide d'un démonstrateur de dimensions proches du colis considéré [81]. Plus récemment, l'Andra a conduit un autre essai à l'aide d'un prototype de dimension réelle en termes de diamètre dans le cadre du projet Européen ESDRED.

En revanche dans le cas du colis CU2, la masse est compatible avec la technique de la poussée par glissement. Le diamètre du colis CU2 est situé à la limite inférieure de l'utilisation de cellules de coussins d'air. Enfin, comme dans le cas des colis CU1, l'incorporation de galets complique le processus de fabrication et augmente la longueur du colis.

En conséquence, la comparaison des trois options présentées ci-dessus a conduit à privilégier la technique du coussin d'air pour les colis de type CU1 et la technique de la poussée par robot à vérins pour les colis de type CU2. Ce dernier principe, étant similaire à celui retenu pour les colis C, ne sera pas développé dans les sections ci-dessous.

9.3.4.2 Description de l'équipement de mise en stockage des colis de type CU1

L'équipement étudié conformément à la technique choisie du coussin d'air est constitué de trois parties : un robot mobile désigné par le terme « aéroporteur », un équipement fixe monté sur le châssis de la hotte de transfert et un équipement fixe installé en tête d'alvéole. L'aéroporteur est relié à l'équipement fixe de la hotte par l'intermédiaire d'un ombilical. L'équipement fixe de la tête d'alvéole contribue avec la hotte à la protection radiologique du personnel.

● L'aéroporteur

L'aéroporteur illustré par la Figure 9.3.16 est constitué de deux composantes reliées entre elles par un système d'attelage : un chariot électrique et un berceau porteur des modules coussins d'air.

L'aéroporteur assure trois fonctions : la mise en sustentation du colis, la poussée du colis ainsi sustenté et le déplacement à vide de l'aéroporteur.

La première fonction (mise en sustentation) est assurée par une structure porteuse des coussins d'air désignée par le terme « berceau ». Ce berceau est positionné sous le colis de stockage dans l'espace ménagé par des rails de 50 mm d'épaisseur fixés sur le chemisage de l'alvéole. Il comprend une douzaine de modules coussin d'air standard qui fonctionnent sous une pression d'environ 4 bars. Ces coussins d'air créent une lame d'air assurant la sustentation du colis.

Chaque module coussin d'air est constitué d'un soufflet annulaire en caoutchouc gonflable cintré au diamètre du colis de stockage. L'air envoyé gonfle d'abord le soufflet en caoutchouc qui se déploie sur une hauteur d'environ 20 mm puis décolle la charge de ses appuis¹³¹. L'air s'échappe ensuite pour former un matelas d'air très fin qui soulève la charge de quelques dixièmes de millimètre. Le colis est alors en état de sustentation et peut être déplacé avec très peu d'effort. Ce principe est illustré par la Figure 9.3.17.

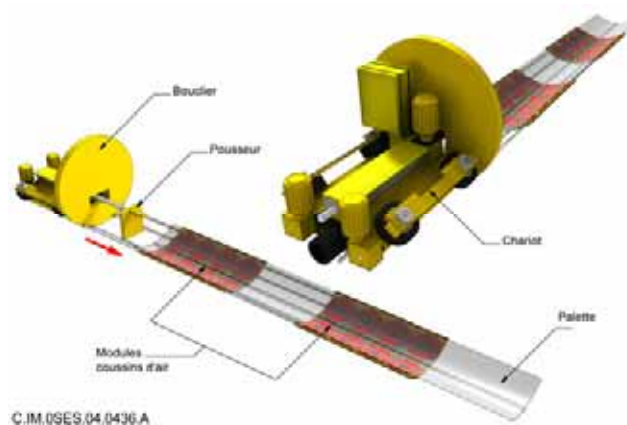


Figure 9.3.16 Aéroporteur

¹³¹ Une plaque intermédiaire appelée palette est placée entre le colis et le coussin d'air. Cette palette en inox présente un état de surface très lisse de façon à obtenir la meilleure efficacité du coussin d'air.

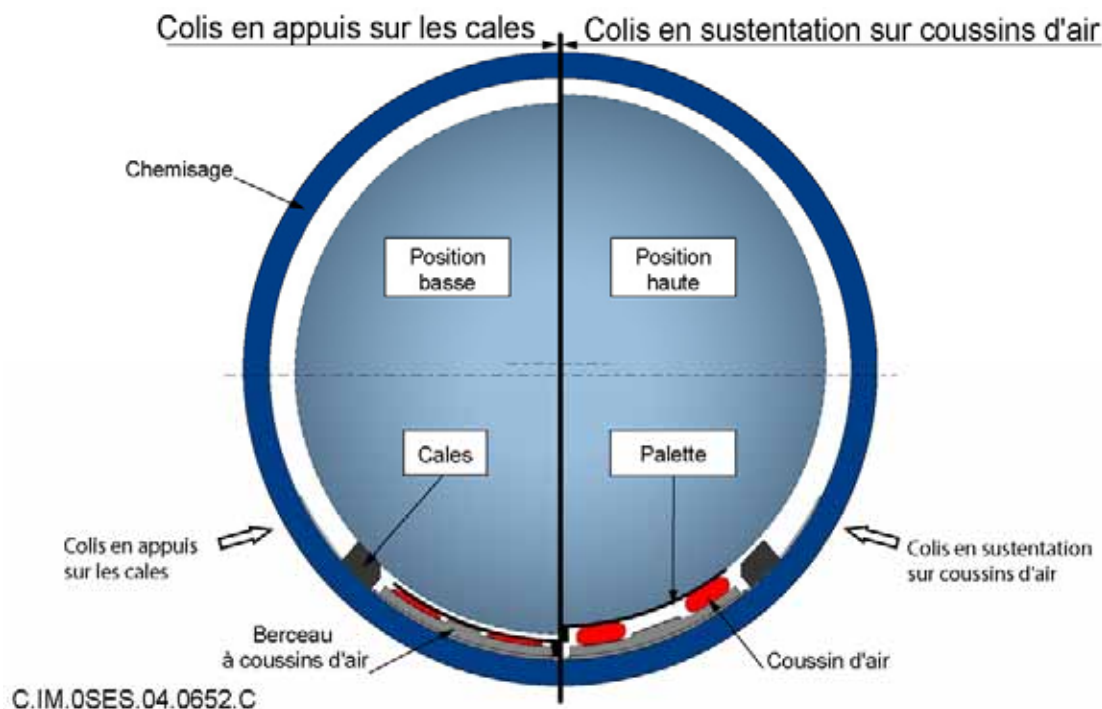


Figure 9.3.17 Principe de fonctionnement des coussins d'air soufflant vers le haut

Les deux autres fonctions (poussée du colis et déplacement à vide de l'aéroporteur) sont assurées par un chariot électrique. Ce chariot est constitué d'une structure roulante assurant le déplacement de l'aéroporteur à vide. Il est relié par un ombilical aux équipements solidaires de la hotte qui l'alimentent en air et en électricité. Il est également relié par un câble à un treuil de rappel.

La fonction roulage est assurée par des galets de roulement motorisés électriques. La fonction « poussage du colis » est assurée par un vérin mécanique de 1 m de course qui déplace le colis lorsque celui-ci est en état de sustentation.

La force nécessaire à sa translation est estimée à moins d'une tonne pour vaincre les quelques efforts résistants liés à des défauts qui pourraient se trouver sur le parcours. La masse du chariot et l'adhérence de ses galets de roulement sur le chemisage de l'alvéole permettent de reprendre la réaction de l'effort de poussée lorsque le vérin est activé.

Une première étude préliminaire a permis d'évaluer l'ordre de grandeur des dimensions du chariot qui sont d'environ 7 mètres de longueur dont 5,50 mètres utiles pour le berceau équipé des coussins d'air et 1,50 mètre pour le chariot électrique attelé en tête.

Le temps pour réaliser le cycle d'un pas de 1 mètre est estimé à environ 5 minutes.

● Les équipements fixes

Comme dans le cas des colis C, la tête d'alvéole est équipée d'un operculaire dont la porte est entraînée par les portes de la hotte.

Les équipements fixes spécifiques au fonctionnement de l'aéroporteur sont constitués d'un treuil de rappel, d'un compresseur d'air, d'un enrouleur de tuyau pneumatique et d'un enrouleur de câbles électriques. Ces équipements peuvent être pour partie solidaires de la hotte (treuil et enrouleurs) et pour partie fixés sur la navette d'accostage (compresseur).

9.3.4.3 Description du processus de mise en alvéole

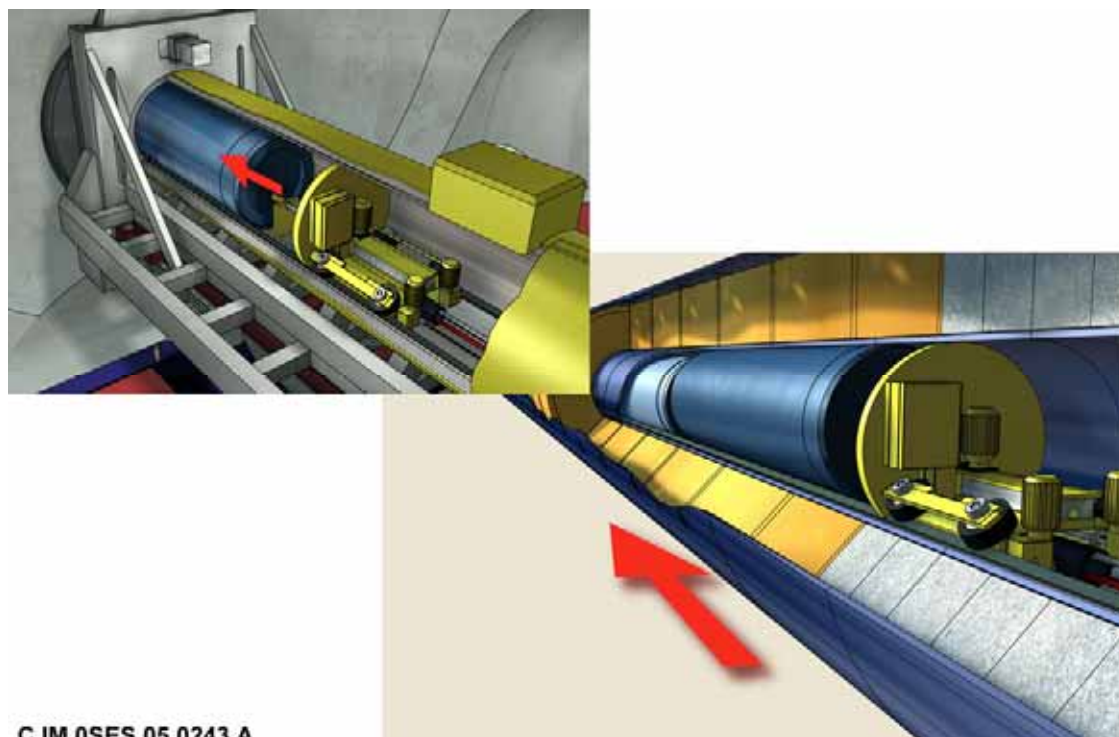
Un cycle de mise en stockage d'un colis de type CU1 est constitué de trois étapes selon une logique identique à celle précédemment décrite pour la hotte de déchets vitrifiés.

Dans une première étape, lors de l'accostage de la hotte, les portes de l'operculaire et de la hotte sont mécaniquement accouplées. La porte de la hotte est motrice et entraîne celle de l'operculaire.

Dans une deuxième étape, l'aéroporteur, actionné selon une logique de fonctionnement pas à pas, transfère le colis de stockage à sa position finale dans l'alvéole.

Enfin dans une dernière étape, l'aéroporteur est ramené dans la hotte à l'aide du treuil de rappel implanté sur l'embase extérieure de la hotte.

Le temps pour réaliser un cycle complet (cf. Figure 9.3.18) de mise en place d'un colis sur une distance d'environ 20 mètres est estimé à 3 heures.



C.IM.0SES.05.0243.A

Figure 9.3.18 Transfert du colis dans l'alvéole

9.3.4.4 Démonstration de la validité du principe retenu par un essai en atelier

Les principes présentés ci-dessus pour la mise en alvéole des colis de combustibles usés de type CU1 (transfert par aéroporteur) font l'objet de tests de validation à l'échelle 1 dans le cadre du projet européen ESDRED coordonné par l'Andra. Le principe de transfert du colis CU2 étant similaire à celui des colis de déchets vitrifiés C, la démonstration de sa validité est réalisée en même temps que celle des colis C décrite dans la section 9.2.

● Test de validation du transfert des colis de type CU1 par aéroporteur

La première partie du test consiste à valider le principe « coussin d'air ». Pour ce faire, une structure prototype porteuse des coussins d'air a été fabriquée (cf. Figure 9.3.19). Une charge simulant la masse du colis a ensuite été appliquée sur une portion de tôle de diamètre à l'échelle 1 (1 255 mm). L'ensemble a alors été mis en sustentation par les coussins d'air et déplacé sur une distance de l'ordre de 1 mètre. Ce test a montré le bon fonctionnement des coussins d'air et confirmé le faible effort de poussée requis pour la translation de la charge. La Figure 9.3.20 illustre cet essai.



Figure 9.3.19 Prototype de berceau à coussins d'air



Figure 9.3.20 Test de translation par coussin d'air d'une charge simulant la forme et le poids d'un colis de stockage de combustible usé de type CUI

La deuxième partie du test, consiste à réaliser un démonstrateur complet à l'échelle 1. Il met en œuvre un tube d'une vingtaine de mètres simulant le chemisage de l'alvéole, un colis factice de même masse et dimensions qu'un colis réel et enfin un robot prototype. Des défauts géométriques et des obstacles sur le tube seront créés pour valider le bon fonctionnement du procédé.

9.3.4.5 Une solution similaire étudiée à l'étranger

L'agence suédoise SKB étudie un concept de stockage horizontal appelé (KBS-3H) dont le principe consiste à déposer dans un tunnel horizontal un super conteneur (diamètre 1,80 m – poids 45 tonnes) constitué d'un conteneur en cuivre de combustibles usés enveloppé par des anneaux de bentonite (Figure 9.3.21). Dans le cadre de ce concept, le recours à la technologie du coussin de fluide est envisagé par SKB. Ce principe est similaire à celui envisagé par l'Andra. Cependant, les irrégularités de parois du tunnel creusé dans le granite risquant de nécessiter de très forts débits pour assurer la sustentation par coussin d'air, SKB envisage de remplacer l'air par de l'eau. Ce projet fera également l'objet d'un démonstrateur technologique à l'échelle 1 réalisé dans le cadre du projet ESDRED coordonné par l'Andra. Un premier test réussi a été réalisé avec le même banc de test que celui utilisé par l'Andra et mentionné précédemment [81].

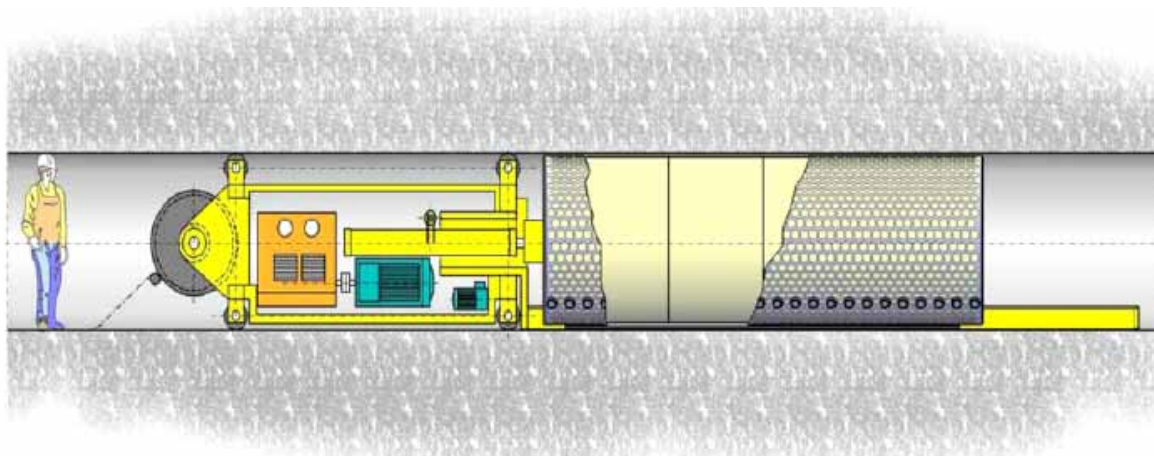


Figure 9.3.21 Schéma du principe adopté par SKB

10

La gestion réversible du stockage

10.1	La conduite du processus de stockage par étapes	368
10.2	La maîtrise du comportement du stockage et la capacité d'action	371
10.3	L'observation et la surveillance.....	386
10.4	La capacité de retrait des colis.....	421
10.5	Conclusion	435

L'objet du présent chapitre est d'exposer les principes de gestion du stockage dans une logique de réversibilité. Comme indiqué au chapitre 2, la réversibilité n'obéit pas à une logique purement technique. Elle vise à répondre aux attentes sociales de conservation d'une liberté de choix. Ce chapitre illustre les dispositions techniques qui permettent d'offrir cette possibilité. Ces dispositions doivent ainsi autoriser les évolutions souhaitées dans la gestion des déchets.

Est présentée tout d'abord la logique de progressivité du processus de stockage, qui consiste à construire, exploiter et fermer le stockage au travers d'une succession d'étapes dont la durée n'est pas fixée a priori. Il est mis en exergue le fait que cette progressivité permet, pendant une durée de plusieurs siècles, de gérer le stockage avec une souplesse similaire à celle d'un entreposage, c'est-à-dire pouvoir facilement retirer les colis si nécessaire ou souhaité. Cette progressivité permet aussi un pilotage souple et flexible de la fermeture du stockage, en maintenant ouverte l'option d'un retour en arrière. Il est également souligné que cette progressivité fournit une capacité d'évolution de la conception du stockage et permet de tirer parti de l'expérience acquise lors des premiers travaux.

Ce chapitre décrit ensuite les principaux phénomènes caractérisant les différentes étapes clés du processus. Il analyse leur impact sur l'état des colis, des ouvrages et de l'argilite, au regard du niveau de réversibilité du stockage et des choix possibles qui sont offerts en matière de gestion du processus. Il met ainsi en exergue la capacité d'action sur le processus de stockage.

Il fournit une description des moyens d'observation des phénomènes au fur et à mesure du déroulement du processus de stockage. Il souligne le parti qu'il est possible de tirer du retour d'expérience des exploitants de grands ouvrages en matière d'auscultation. Il montre qu'à chaque étape, des techniques de mesures fiables et durables pourront ainsi enrichir les connaissances et apporter des éléments complémentaires, notamment dans la prise de décision lors du passage d'une étape à la suivante.

Ce chapitre propose enfin une esquisse des moyens technologiques qui pourraient être mis en œuvre s'il était décidé de revenir aux étapes précédentes du processus de stockage et de retirer les colis. Il montre le réalisme technique d'une telle éventualité.

10.1 La conduite du processus de stockage par étapes

Cette section identifie les différentes étapes du processus de stockage depuis l'accueil des premiers colis de déchets jusqu'à la fermeture de l'ensemble des installations.

10.1.1 L'exploitation progressive du stockage

La mise en service industriel de l'installation démarre avec la réception des premiers colis sur le site et leur mise en stockage dans les premières alvéoles construites. Simultanément à l'exploitation de ces alvéoles, de nouveaux modules pourraient être progressivement mis en construction. La conception des infrastructures caractérisée par des puits et des galeries distincts pour les activités de construction et de stockage rend possible la coexistence de ces deux types d'activités et permet leur progression de manière indépendante l'une de l'autre.

L'ensemble des alvéoles B pourrait être construit et exploité de façon progressive pendant 40 ans au rythme d'un nouveau module chaque année. L'ensemble des modules C pourrait être construit et exploité sur une durée d'environ 50 ans à un rythme d'un nouveau module de stockage initié tous les deux ans.

Dans l'hypothèse d'un stockage des combustibles usés, le rythme de progression pourrait être d'une unité d'exploitation tous les deux ans environ pour les combustibles de type CU2 et d'une unité d'exploitation tous les ans pour les combustibles usés de type CU1. Les durées globales de construction et d'exploitation seraient alors d'environ 35 ans pour les combustibles usés de type CU1 et d'environ 30 ans pour les combustibles usés de type CU2.

Ainsi pour résorber l'ensemble des colis de déchets dans des conditions techniques et économiques raisonnables, la durée d'exploitation du stockage serait au minimum de plusieurs décennies et pourrait

atteindre des durées de l'ordre du siècle. Cette estimation temporelle, fondée sur l'inventaire des colis de déchets français, est du même ordre de grandeur dans les autres pays européens.

Pendant la phase d'exploitation, le processus de mise en stockage est donc progressif. Après la mise en place des colis dans les alvéoles de stockage, ceux-ci peuvent être gérés avec une souplesse de gestion comparable à celle d'un entreposage caractérisé par une totale réversibilité.

Un stockage est aussi conçu pour pouvoir être fermé, contrairement à un entreposage et pour constituer un système sûr à long terme sans nécessiter d'intervention humaine. Cette fermeture est réalisée par étapes successives. Le niveau de réversibilité diminue progressivement au fur et à mesure du franchissement de ces étapes. La configuration dans laquelle l'ensemble des installations est fermé constitue le niveau de réversibilité le plus faible.

10.1.2 La fermeture progressive du stockage

À l'issue d'une période d'observation de durée non définie a priori, les alvéoles remplies sont fermées dans le cadre d'une décision formelle marquant ainsi la volonté de franchir un jalon et d'initier le processus de fermeture.

Le processus de fermeture débute ainsi avec le scellement d'alvéoles. À l'issue de ce scellement, la galerie desservant les alvéoles reste accessible. Une nouvelle phase d'observation peut alors être mise en œuvre.

La décision suivante porte sur le remblaiement des galeries d'accès aux alvéoles (galeries internes au module). Cette opération dure environ 2 à 4 ans suivant la taille du module de stockage. À l'issue de ces travaux, les galeries de liaison desservant le module remblayé restent accessibles. Une phase d'observation peut ici encore être mise en œuvre.

En fonction des décisions prises, les travaux de fermeture de certains modules déjà remplis à l'intérieur d'une zone de stockage peuvent être simultanés aux activités de mise en place de colis dans d'autres modules.

Les décisions suivantes concernent la fermeture des galeries de liaison. Celle-ci commencerait, dans une première zone de stockage, par le remblayage des tronçons de galeries desservant les modules de stockage les plus éloignés, et par leur scellement. À l'issue de ces travaux, les galeries de liaison principales vers les zones de stockage fermées resteraient accessibles.

Il est à noter que la conception modulaire du stockage permet d'envisager la fermeture de certains ouvrages alors que d'autres sont encore en exploitation.

Après la fermeture des zones de stockage, la poursuite du processus porterait sur le remblayage et le scellement des galeries de liaison principales. Enfin, la dernière étape concernerait le scellement des puits d'accès à la formation géologique.

À l'issue de cette dernière étape, qui achève le processus de fermeture, l'ensemble du stockage se trouve en configuration dite de « post-fermeture ». Le stockage ne nécessite alors plus de maintenance, ni de travaux complémentaires. Il devient complètement passif et sûr à très long terme.

Ainsi, la progressivité de la fermeture du stockage offre la possibilité de mettre en œuvre un processus décisionnel constitué de plusieurs étapes successives avec la possibilité de ménager un temps d'observation et de décider un maintien de l'installation en l'état, le passage à l'étape suivante ou un retour en arrière. La décision de passage d'une étape à l'autre est facilitée par les informations apportées par l'observation du comportement des ouvrages. Cette logique constitue un élément favorable à la réversibilité du stockage dans la mesure où elle autorise, à tout moment, un retour à l'étape précédente.

10.1.3 Les étapes clés du processus de stockage

La présente section décrit les étapes clés qui permettent un pilotage souple et flexible du processus de stockage [83]. Ces étapes constituent la base sur laquelle est fondée la description de la gestion réversible du stockage dans les sections qui suivent (cf. Figure 10.1.1).

- **Étape « après mise en place des colis »**

L'étape « Après mise en place des colis » correspond à la période où une ou plusieurs alvéoles sont remplies de colis et non scellées. Au cours de cette étape, l'alvéole est mise en sécurité d'un point de vue radiologique par un dispositif mécanique blindé totalement réversible qui protège les opérateurs présents dans les galeries d'accès. Le réseau de galeries de liaison et d'accès ainsi que les puits sont entièrement accessibles. À cette étape, la seule différence entre une alvéole de déchets B et une alvéole de déchets C ou de combustibles usés réside dans le fait que la première est ventilée, alors que dans la deuxième le renouvellement de l'air est très limité par le dispositif d'obturation.

Certains ouvrages font l'objet d'une observation. Les galeries sont ventilées permettant ainsi l'accès à l'ensemble du réseau. À tout moment, le dispositif d'obturation mécanique des alvéoles de stockage peut être ouvert pour une reprise éventuelle des colis sans délai préalable. Cette étape est comparable à une configuration d'entreposage.

- **Étape « après scellement de l'alvéole »**

L'étape « Après scellement des alvéoles » débute à l'issue de la fermeture des alvéoles par un bouchon d'argile gonflante. Ce bouchon limite les échanges physico-chimiques entre l'alvéole et la galerie d'accès. À cette étape, les galeries d'accès aux alvéoles sont ventilées et les têtes d'alvéoles scellées sont donc accessibles. L'observation de certains ouvrages est poursuivie. Pendant cette étape, la reprise des colis est techniquement possible. Elle nécessite des travaux préparatoires consistant à enlever le bouchon d'argile et à remettre en état la tête d'alvéole.

- **Étape « après fermeture d'un module »**

L'étape « Après fermeture d'un module » débute à l'issue du scellement et du remblayage de toutes les composantes d'un module. Cette étape ne se distingue pas de l'étape précédente dans le cas des alvéoles B, puisqu'un module n'est constitué que d'une seule alvéole. En revanche dans le cas des modules de déchets C ou de combustibles usés, la fermeture du module comprend le remblayage des galeries d'accès internes au module. Les galeries de liaison desservant le module restent ventilées et accessibles.

À cette étape, la reprise des colis est également techniquement possible. Les travaux préparatoires à cette opération éventuelle sont plus longs que dans le cas précédent. Ils consistent à enlever le remblayage des galeries par des méthodes de creusement similaires à celles qui ont été mises en oeuvre pour la construction, puis comme à l'étape précédente, à remettre en état les têtes d'alvéole.

Les étapes suivantes concernent l'ensemble du stockage et non plus uniquement chaque module.

- **Étape « après fermeture d'une zone de stockage »**

L'étape « Après fermeture d'une zone de stockage » débute lorsque les galeries de liaison internes à une zone de stockage sont remblayées et scellées. À cette étape les galeries de liaison principales donnant l'accès à la zone de stockage considérée restent ventilées et accessibles. Le passage à cette étape a peu d'impact phénoménologique sur l'évolution des modules de stockage et ne fait qu'augmenter les longueurs de galerie à débayer pour accéder aux colis en cas de retrait.

- **Étape « post fermeture »**

L'étape « Post-fermeture » débute après le scellement et le remblayage des puits. Elle correspond à la fin du processus de stockage. Le stockage se trouve alors en configuration de « post-fermeture ». Toutefois, une période d'observation du stockage fermé et de son environnement peut être envisagée.

Bien que plus complexe, le retrait des colis reste techniquement possible dans cette configuration [20], [16].

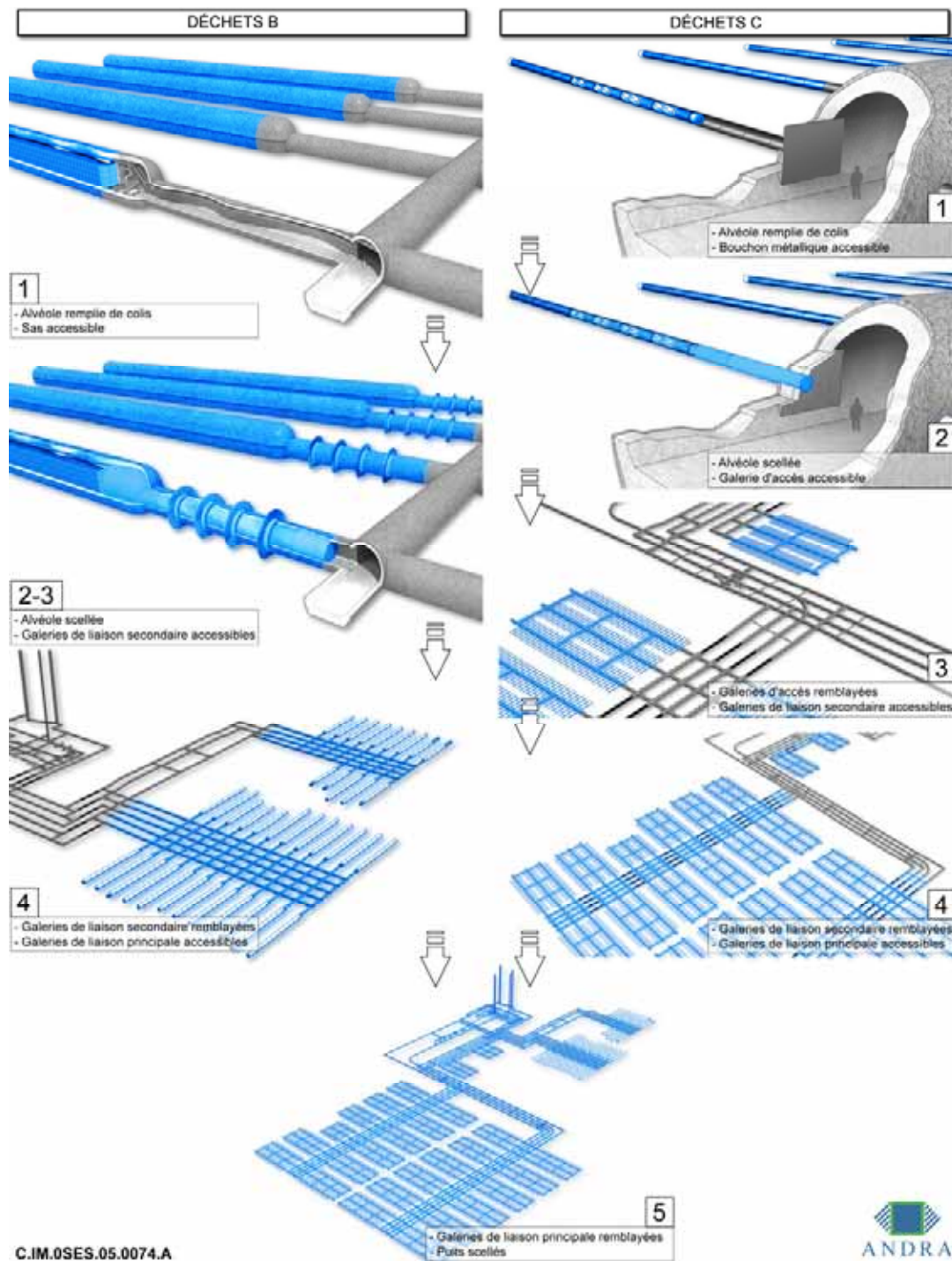


Figure 10.1.1 Les étapes clés d'exploitation et de fermeture d'un stockage

10.2 La maîtrise du comportement du stockage et la capacité d'action

Cette section présente l'évolution de l'état des ouvrages et des colis au fur et à mesure de l'avancement du processus de stockage [82]. Pour chacune des étapes clés définies précédemment, elle met en exergue les principaux phénomènes et montre dans quelle mesure ceux-ci sont susceptibles d'affecter la capacité d'action sur le processus et une éventuelle opération de retrait des colis [83]. Dans chaque cas, elle précise les constantes de temps propres à chaque étape, étant entendu qu'elles correspondent à

des évolutions sans changement ou intervention majeure dans la gestion du stockage. Elle souligne également l'effet potentiel, à plus long terme, de l'évolution du stockage vis-à-vis des fonctions de sûreté.

10.2.1 Le comportement des alvéoles de déchets B

Pour les alvéoles de déchets B, seules deux étapes ont un impact significatif sur leur comportement pendant l'exploitation du stockage. Il s'agit de l'étape « après mise en place des colis » pendant laquelle l'alvéole est ventilée et de l'étape « après scellement de l'alvéole » (qui se confond avec l'étape « après scellement d'un module ») pendant laquelle l'alvéole n'est plus ventilée. Les étapes suivantes « après fermeture de la zone de stockage » et « post-fermeture » n'ont aucun impact notable sur l'évolution physique et chimique des alvéoles de déchets B.

10.2.1.1 Étape « après mise en place des colis »

Au cours de cette étape, les têtes d'alvéoles remplies de colis sont accessibles dans les mêmes conditions qu'au moment de la mise en stockage (cf. Figure 10.2.1). La ventilation des chambres de stockage est maintenue et les têtes d'alvéoles sont toujours équipées de leur sas de radioprotection et des dispositifs mécaniques associés ayant servi à la mise en place des colis. Les galeries d'accès sont ventilées, maintenues et accessibles. Une partie des ouvrages et notamment des alvéoles fait l'objet d'une observation par mesures physiques complétées par des contrôles visuels.

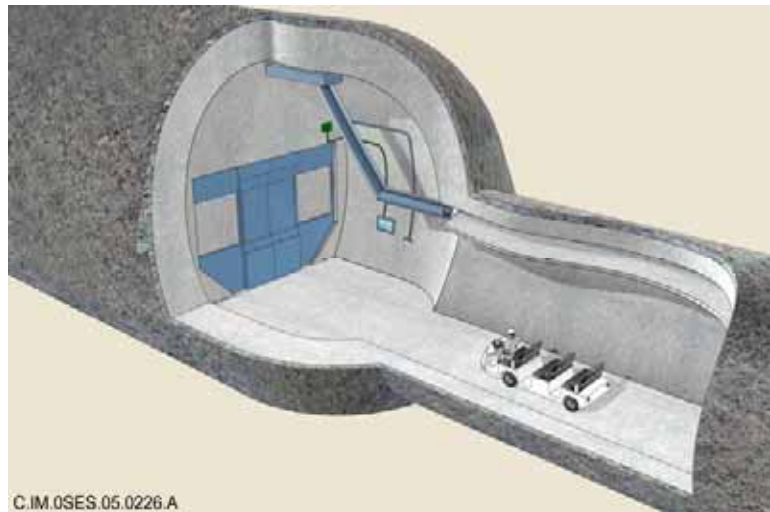


Figure 10.2.1 Accessibilité des têtes d'alvéoles B

● Évolution de l'alvéole

L'altération chimique du béton de revêtement est très lente, du fait notamment de la faible hygrométrie de l'air de ventilation (évaluée à 50 %).

Le revêtement est progressivement chargé par la poussée de la roche. Néanmoins, l'état désaturé de la roche en paroi tend à réduire la vitesse de ses déformations différées et donc à freiner l'augmentation de la poussée sur le revêtement. L'épaisseur de revêtement adoptée lui permet de résister à la poussée de la roche sans perdre sa rigidité pendant au moins un siècle et il a été montré au chapitre 5.1 qu'elle peut assurer la stabilité géotechnique de l'alvéole pendant deux à trois cents ans au minimum et vraisemblablement au-delà. Ainsi, les jeux de manutention laissés libres autour des colis de stockage n'évoluent pas sensiblement à cette échelle de temps.

Comme pour le béton de revêtement, la faible hygrométrie de l'air dans l'alvéole a peu d'impact sur le béton constitutif des colis de stockage, qui est initialement fortement désaturé et l'évolution physico-chimique du béton des colis (carbonatation atmosphérique, corrosion des armatures) est extrêmement lente [48]. La lenteur de l'altération des colis de stockage et leur résistance mécanique leur confèrent une intégrité d'ordre au moins séculaire sans intervention. La faible corrosion des métaux concerne aussi les conteneurs primaires de déchets, placés dans les colis de stockage. Les éléments radioactifs peuvent être ainsi durablement confinés à l'intérieur des colis (à l'exception des radionucléides gazeux mentionnés supra).

Par ailleurs, l'introduction de certains colis induit d'un point de vue phénoménologique une production de gaz ou de chaleur.

Les colis contenant des enrobés bitumés (colis types B2) et les colis irradiants qui comportent de la matière organique (par exemple, les colis type B5.1) dégagent des gaz par radiolyse des matériaux constitutifs, principalement de l'hydrogène, mais aussi du gaz carbonique ou du méthane. Les quantités de gaz dégagé hors des colis de stockage sont de l'ordre de quelques litres à quelques dizaines de litres de gaz par colis et par an. En outre, certains colis (par exemple les colis types B5.1) peuvent aussi dégager des traces de gaz radioactifs en très faible quantité [62]. L'architecture présentée au chapitre 5 montre qu'il est possible de placer les colis dégageant des gaz dans des alvéoles dédiées. Les faibles quantités de gaz (radioactifs ou non) sont évacuées par la ventilation. Elles sont suffisamment faibles pour qu'il soit possible d'arrêter la ventilation pendant plusieurs semaines si nécessaire.

Le dégagement de chaleur ne provient que de certains colis, principalement les colis types B5.1, B5.2 et B1. Celui-ci est modeste au regard de celui des déchets C, mais il ne peut être négligé. Toutefois, la ventilation à l'intérieur des alvéoles permet d'évacuer environ 80 à 90 % de la chaleur dégagée, même avec un débit d'air relativement faible de 3 m³/s. L'impact de ce dégagement de chaleur sur l'alvéole est donc limité : l'air en fond d'alvéole, après avoir traversé toute l'alvéole, a ainsi une température maximale légèrement inférieure à 40 °C et la température maximale des colis de stockage reste inférieure à 40 °C [10].

Il convient de noter que le maintien de l'alvéole en l'état et en particulier le maintien de la ventilation pendant plusieurs décennies ou siècles n'augmente pas notablement les perturbations induites par le creusement. En effet, même si le front de désaturation peut atteindre la roche non fissurée, celle-ci se désature très peu et l'extension de la zone de roche microfissurée ne varie pas [8], [57]. En outre, l'oxydation, par l'oxygène de l'air, des pyrites et de la matière organique présentes dans la roche ainsi que les perturbations chimiques associées sont faibles et restent limitées dans la zone de roche fracturée éventuellement créée par le creusement [84]. Ainsi, les perturbations chimiques et hydro-mécaniques, induites par le maintien de la ventilation, restent limitées dans l'EDZ, dont l'extension n'augmente pas tant que le revêtement est intègre¹³².

● **Capacité d'action et durée possible de l'étape**

Les conditions de stockage des colis à cette étape sont similaires à celles d'un entreposage. Les déformations du revêtement sont suffisamment faibles pour ne pas modifier la géométrie de la chambre de stockage. Un éventuel retrait des colis pourrait donc être réalisé par simple inversion du processus de mise en place (voir §10.4). La ventilation assure l'évacuation des gaz de radiolyse et de la chaleur, éventuellement dégagés par les colis. Le maintien de la ventilation dans les alvéoles ne requiert qu'un faible débit d'air supplémentaire à l'entrée de la zone de stockage. On notera que les conditions régnant dans le stockage sont moins sensibles aux variations saisonnières que dans une installation en surface. En effet à l'entrée des alvéoles, la température de l'air est toujours à la température de la roche au niveau d'implantation du stockage (22 °C) et l'hygrométrie varie autour de 50 % (30 à 80 % pour l'amplitude de variation de l'hygrométrie) [8].

¹³² Plus précisément, les déformations différées des argilites tendent à fermer et recomprimer les fissures de la roche en présence d'un revêtement rigide [66].

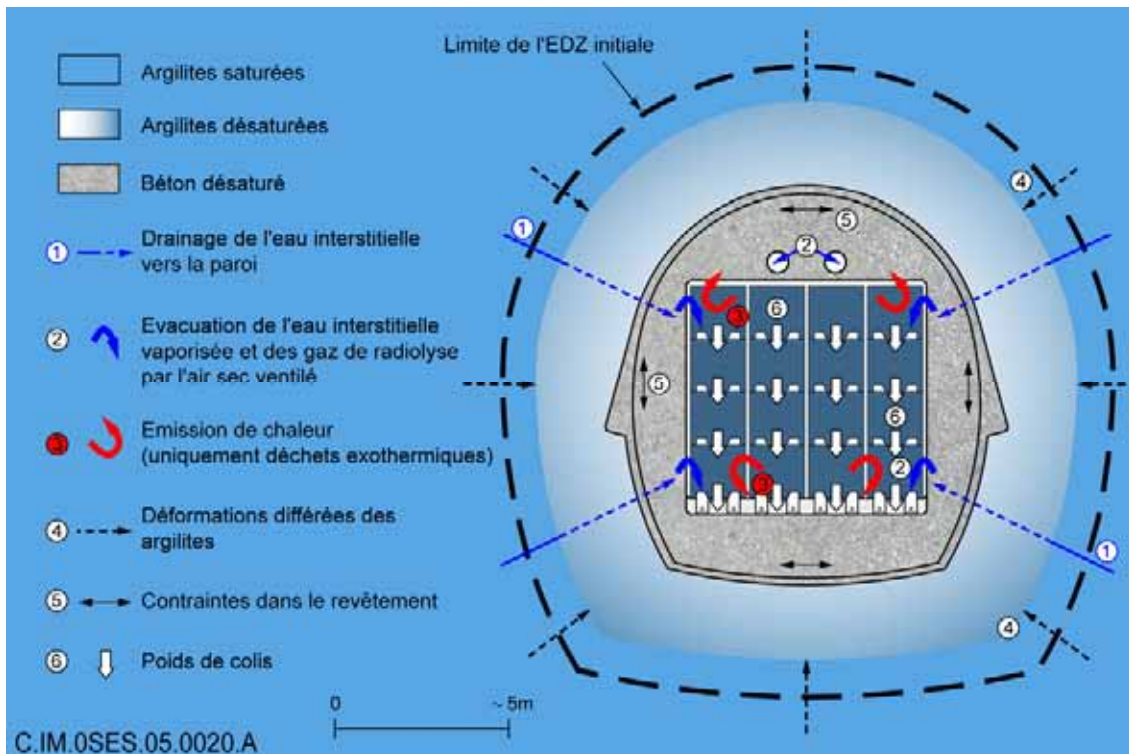


Figure 10.2.2 Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets B après mise en place des colis de stockage

Cette étape se caractérise par une durée techniquement possible de plusieurs siècles, correspondant à la durée d'intégrité du revêtement.

Le suivi de l'augmentation des contraintes dans le revêtement grâce au dispositif d'observation mis en place à la construction (cf. § 10.3.) est un moyen de réévaluer régulièrement et d'affiner la prévision de cette durée de vie. Si l'on souhaitait prolonger cette étape sur des échelles de temps plus longues, l'intervention de l'homme serait nécessaire, notamment pour reprendre les colis et adapter les installations.

10.2.1.2 Étape « après scellement de l'alvéole »

La fermeture de l'alvéole consiste à arrêter la ventilation et à mettre en place un scellement dans la galerie d'accès à l'alvéole. L'arrêt de la ventilation a un impact sur l'évolution de l'alvéole, alors que la mise en place du scellement ne concerne essentiellement que l'évolution de la galerie d'accès et du scellement lui-même.

Cette action de fermeture est une étape importante dans le processus de stockage, car elle réduit l'accessibilité aux colis de déchets (cf. Figure 10.2.3) et elle rend plus difficile la poursuite de l'auscultation de l'alvéole. Toutefois, des solutions techniques existent pour continuer à suivre l'évolution de l'alvéole (cf. section 10.3).

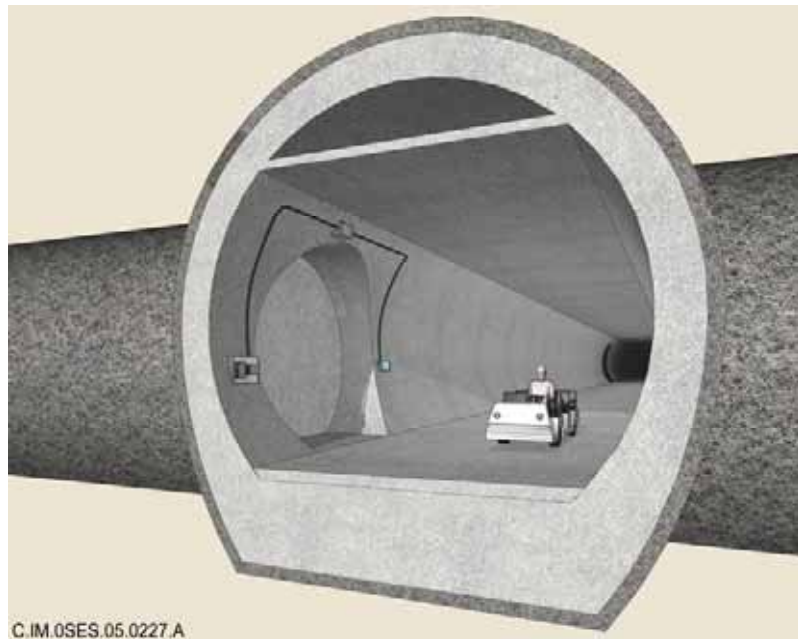


Figure 10.2.3 Accessibilité à l'entrée des galeries d'accès scellées

En outre, des opérations de maintenance des équipements et du revêtement des galeries de liaison accessibles peuvent être réalisées en fonction des inspections visuelles régulières et des résultats d'auscultation dédiés à la surveillance de ces ouvrages.

Par ailleurs, dans le cas d'un éventuel retrait des colis, il est techniquement possible de démanteler le scellement et remettre en état la galerie d'accès, comme indiqué dans la section 10.4.

● Évolution de l'alvéole

L'arrêt de la ventilation induit assez rapidement une modification des conditions physiques dans les alvéoles : consommation de l'oxygène de l'air et, pour certaines alvéoles, échauffement des colis et de l'alvéole ou accumulation de gaz de radiolyse. De plus, il stoppe la cinétique de désaturation de la roche et déclenche ainsi le processus de resaturation de l'alvéole et du scellement.

Ce processus de resaturation constitue une phase importante d'évolution de l'alvéole, même si cette évolution est très lente à cause de la très faible perméabilité des argilites. Le processus de resaturation de la roche et du revêtement s'accompagne d'une augmentation de l'hygrométrie de l'air dans l'alvéole, qui est ainsi toujours en équilibre avec l'état hydrique du béton en paroi d'alvéole. L'augmentation de l'hygrométrie contribue simultanément à augmenter par capillarité le degré de saturation du béton des colis de stockage. Cependant, du fait de la lente resaturation des alvéoles¹³³[8], il n'y aura pas, à l'échelle pluriséculaire, d'eau liquide dans les vides entre les colis et le béton de revêtement. Le béton des colis de stockage restera non saturé.

Dans les alvéoles contenant des colis faiblement exothermiques (colis types B1 et B5 essentiellement), la chaleur n'est plus évacuée par la ventilation. La température des colis, puis du revêtement et de la roche augmente. La température maximale des colis reste inférieure à 60 °C [10]. Elle est atteinte un peu moins de dix ans après l'arrêt de la ventilation. Ensuite, la température des colis décroît lentement d'environ 1 °C par décennie au début, puis de plus en plus lentement. La température dans une alvéole

¹³³ La durée de resaturation de l'alvéole est évaluée à plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'années.

contenant des déchets non exothermiques reste toujours inférieure à 30 °C. Le suivi de la température permet de vérifier que les températures atteintes satisfont bien les critères fixés (voir chapitre 5) et de connaître son état au moment d'un éventuel retrait des colis.

Pour les alvéoles dans lesquelles des colis dégagent des gaz par radiolyse, la fermeture et surtout l'arrêt de la ventilation conduisent à un piégeage et à une lente accumulation de ces gaz. Compte tenu de la très lente décroissance de leur production [62], la durée de la période de ventilation avant scellement ne modifie que très peu la cinétique d'accumulation des gaz dans l'alvéole. Lorsqu'ils s'accumulent dans une alvéole, ces gaz se mettent légèrement en pression. Tant que la galerie de liaison est ouverte et ventilée, la différence de pression de gaz entre les deux extrémités de la galerie d'accès à l'alvéole favorise le transfert de ces gaz à travers le scellement, non saturé. Ces faibles quantités de gaz peuvent être diluées dans l'air de ventilation des galeries de liaison ou si nécessaire être captées. En outre, cette accumulation de gaz contribue à freiner le processus, déjà très lent, de resaturation des alvéoles.

L'absence d'eau dans l'alvéole pendant plusieurs siècles limite fortement la dégradation chimique du revêtement, des colis de stockage et des colis primaires (par carbonatation, hydrolyse, oxydation, corrosion). L'évolution de l'alvéole provient donc surtout de l'augmentation très lente et progressive de la poussée des argilites sur le revêtement au cours de leur resaturation. Cette poussée, très faible, voire arrêtée tant que la roche était désaturée, reste cependant suffisamment modérée pour que le revêtement et le béton de remplissage restent intègres à l'échelle de plusieurs siècles (voir chapitre 5) [57]. La durabilité du revêtement et le maintien des jeux fonctionnels entre les colis et la paroi ne se dégradent donc pas après fermeture de l'alvéole. De même, tant que le revêtement est intègre, les jeux fonctionnels entre colis devraient n'avoir pas ou peu évolué.

Dans ces conditions, les colis de stockage restent intègres, car ils ne sont pas sollicités par d'autres charges que le poids des colis sus-jacents. L'absence de dégradation notable des colis de stockage et des colis primaires empêche ainsi la dissémination de matières radioactives dans l'alvéole.

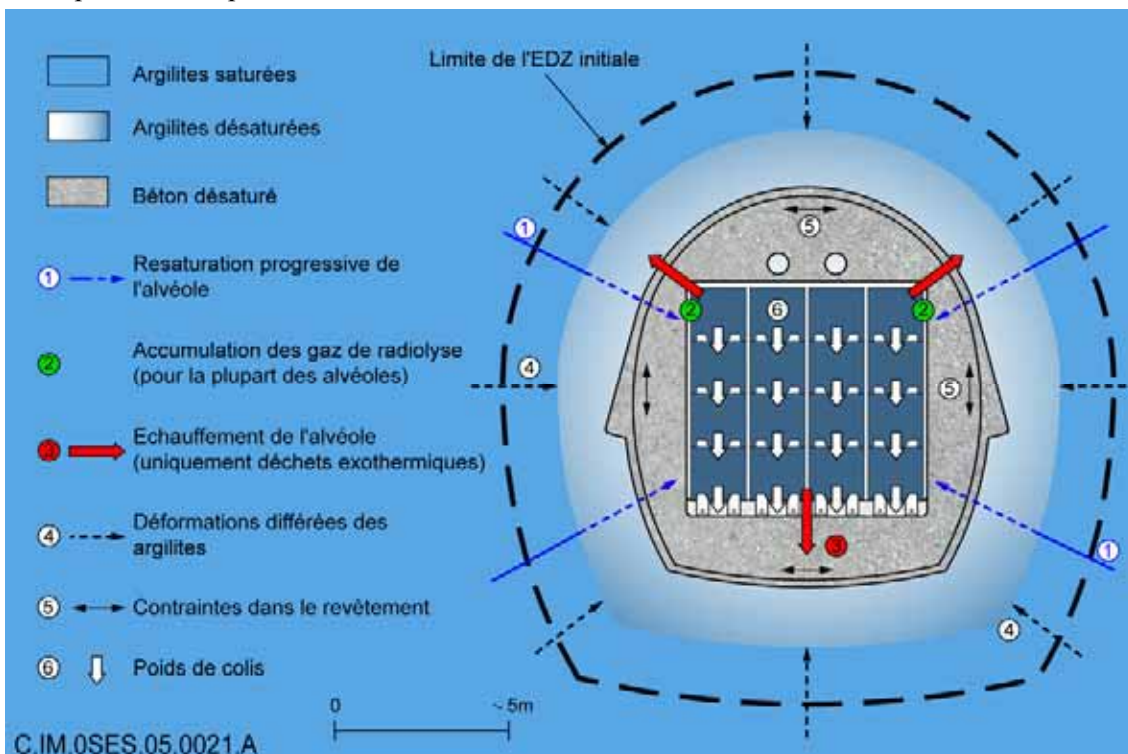


Figure 10.2.4 Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets B après fermeture.

● **Évolution de la galerie d'accès et du scellement**

Dans la galerie d'accès, l'arrêt de la ventilation provoque, comme dans l'alvéole, la resaturation très lente de la roche. À l'échelle pluriséculaire, la roche en paroi et le béton de revêtement sont encore significativement désaturés ainsi que l'argile du scellement [8], [66]. Le gonflement de l'argile du scellement provoqué par la resaturation reste donc très limité, voire inexistant, pendant l'exploitation du stockage.

Dans les galeries d'accès aux alvéoles de déchets faiblement exothermiques, le scellement freine notablement la propagation de la chaleur ; la température à l'extrémité aval du scellement dans la zone accessible n'augmente que de quelques degrés. En outre, comme le béton de revêtement de l'alvéole, les massifs d'appui en béton, situés de part et d'autre du scellement argileux, restent intègres à l'échelle pluriséculaire, voire beaucoup plus.

La faible évolution du scellement à l'échelle de temps pluriséculaire [85] facilite son éventuel démantèlement dans le cas d'un retour en arrière pour récupérer les colis ou simplement pour revenir dans des conditions d'exploitation proches de celles d'un entreposage.

● **Capacité d'action et durée possible de l'étape**

À cette étape, le retrait des colis reste techniquement possible par des moyens similaires à ceux de mise en place, grâce au maintien des jeux fonctionnels dans l'alvéole, tant que cette dernière est mécaniquement stable, soit plusieurs siècles après sa construction. Il nécessiterait cependant des travaux préparatoires dont le contenu technique, décrit à la section 10.4, pourrait être adapté en fonction de l'état de l'alvéole, connu à travers l'analyse des résultats d'observation.

L'observation du revêtement et de la poussée du terrain sur le revêtement, associée à la mesure de la température dans l'alvéole, peut être poursuivie autant que possible pour disposer d'une bonne connaissance de l'état effectif de l'alvéole.

Le suivi des quantités de gaz effectivement dégagées dans l'alvéole et évacuées par la ventilation à l'étape précédente, permet de préciser la cinétique de production de gaz et ainsi d'affiner la prédiction des quantités de gaz piégées dans l'alvéole après fermeture.

Le maintien en état des galeries de liaison et des puits peut s'effectuer sur des durées très grandes (quelques siècles au plus) de par la durabilité de leurs revêtements et la possibilité d'une maintenance. Cela a peu d'impact sur l'évolution des alvéoles.

10.2.2 Le comportement des alvéoles de déchets C (ou de combustibles usés)

L'évolution des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés est marquée pendant l'exploitation du stockage par trois étapes principales : « après mise en place des colis », « après scellement de l'alvéole » et « après remblaiement d'un module ». Cette dernière étape a en fait un faible impact sur l'évolution des alvéoles, mais elle est importante à mentionner, car elle réduit notablement l'accessibilité aux alvéoles et donc aux colis stockés.

10.2.2.1 Étape « après mise en place des colis »

Les têtes d'alvéole sont accessibles dans les mêmes conditions qu'au moment de la mise en stockage. Comme dans le cas des déchets B vu précédemment, les galeries d'accès sont ventilées, maintenues et accessibles (cf. Figure 10.2.5). Une partie des ouvrages et notamment des alvéoles fait l'objet d'une observation par mesures physiques complétées par des contrôles visuels.

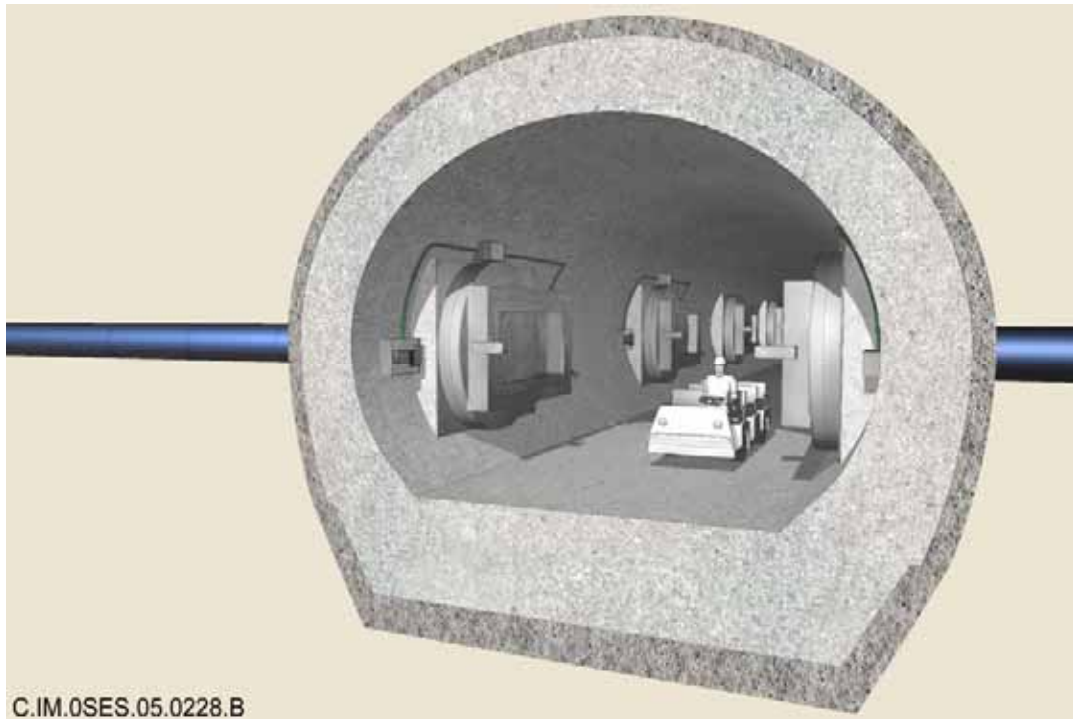


Figure 10.2.5 *Accessibilité aux têtes d'alvéoles C*

● **Évolution de l'alvéole**

L'évolution de l'alvéole non seulement lors de cette étape, mais aussi lors des étapes suivantes est essentiellement liée au dégagement thermique engendré par les déchets [13], [10].

En raison de la forte conductivité thermique des composants métalliques, la température s'homogénéise très rapidement dans le chemisage tout au long de l'alvéole. Elle augmente presque simultanément dans la roche : après un an de stockage, la température atteint en paroi de roche près de 40 °C pour les colis types C0 et plus de 50 °C¹³⁴ pour les colis types C1 à C4. L'interaction thermique entre alvéoles voisines se fait déjà sentir par une augmentation de 5 °C à mi-distance entre alvéoles de déchets C. Dans les alvéoles de combustibles usés, le transfert de chaleur est ralenti par l'argile gonflante car sa conductivité thermique est moins élevée que celle des argilites. Ainsi, l'échauffement de la roche en paroi est retardé et amoindri par l'anneau d'argile qui maintient une différence de température de l'ordre de 30 °C entre ses faces interne et externe pendant la montée en température.

La température maximale, en surface des colis, comprise entre 90 °C et 100 °C, résulte du dimensionnement de l'architecture de chaque zone de stockage pour un âge donné des colis (cf.§ 5.2 et 5.3). Cette température maximale est atteinte au bout de 10 à 20 ans, pour tous les colis types de déchets C ou de combustibles usés. Au même moment, les argilites ou l'argile gonflante au contact avec le chemisage atteignent une température comprise entre 80 °C et 90 °C.

Cette montée en température au sein des alvéoles ne serait pas modifiée de manière significative par le scellement des alvéoles immédiatement après leur remplissage. La montée en température étant relativement rapide (de 10 à 20 ans), il pourrait être envisagé de maintenir l'alvéole non scellée pendant cette phase transitoire d'évolution pour permettre de l'observer le plus complètement possible sans avoir de fortes contraintes de transmission des mesures (cf.10.3.8.3). En outre, une bonne connaissance de la température des colis et de l'alvéole est nécessaire pour vérifier que l'alvéole se comporte comme attendu et en particulier pour connaître les conditions effectives au sein de l'alvéole en cas de retrait des colis.

¹³⁴ Les températures et les durées indiquées dans cette section correspondent au dimensionnement de référence retenu pour les études (cf. chapitres 5 et 6)

La propagation de la chaleur à partir des alvéoles conduit à un échauffement dans les galeries d'accès au sein du module. La température de la roche en paroi reste inférieure à 60 °C à proximité des alvéoles. Dans les galeries, la ventilation maintient la température de l'air à une valeur inférieure aux limites réglementaires pour l'intervention de personnel. Les effets thermomécaniques sur le revêtement induits par cet échauffement sont pris en compte dans le dimensionnement et ne réduisent pas la durabilité des ouvrages (voir sections 5.2, 5.3 et [13]).

Un des principaux effets induits par l'échauffement de l'alvéole est la dilatation des colis, du chemisage, de l'argile gonflante pour les alvéoles de combustibles usés et de la roche. Du fait des jeux de mise en place entre les colis d'une part et entre les colis et le chemisage d'autre part¹³⁵, la dilatation thermique des colis, des intercalaires et du chemisage ne crée pas de contraintes thermomécaniques notables au sein des colis¹³⁶ et les déformations induites sont suffisamment faibles pour ne pas bloquer les colis et les intercalaires, même au moment où elles atteignent leur amplitude maximale. Le retrait éventuel des colis est donc possible à tout moment, quelle que soit l'amplitude des déformations de dilatation dans l'alvéole.

L'échauffement de la roche provoque également une accélération des déformations différées des argilites (d'un facteur de 2 à 3). Pour les alvéoles de déchets C, cette accélération favorise la fermeture du jeu fonctionnel de mise en place du chemisage et accentue la pression du terrain sur le chemisage après fermeture de ce jeu fonctionnel. Cependant, le dimensionnement du chemisage permet, dès la fermeture du jeu fonctionnel, de garantir une durabilité du chemisage et un maintien de la géométrie dans le chemisage pendant au moins deux ou trois cents ans et vraisemblablement plus.

La durabilité du chemisage est favorisée par les conditions environnementales, qui limitent fortement la corrosion du chemisage [53]. La corrosion est tout d'abord limitée par l'absence de renouvellement de l'oxygène dans l'alvéole, grâce à la mise en place d'un operculaire, dès la construction des alvéoles. Après la mise en place des colis, il peut être envisagé de remplacer l'operculaire par un capot d'étanchéité pour toute la durée de l'étape. Cette corrosion oxydante puis anoxique est en outre fortement limitée par les très faibles quantités de vapeur d'eau piégées à l'intérieur du chemisage. La corrosion n'a donc pas d'impact notable sur la durabilité du chemisage.

La face externe du chemisage, en contact avec une roche qui reste toujours saturée, se corrode uniquement en conditions anoxiques, c'est-à-dire très lentement (quelques micromètres par an), sauf en tête d'alvéole au droit de la zone de roche désaturée par la ventilation de la galerie d'accès. Dans cette zone, de la corrosion oxydante (quelques dizaines de micromètres par an) peut se produire mais elle est significativement freinée par le transfert de l'oxygène dans la faible porosité de la roche et du béton [53].

Dans le cas des alvéoles de combustibles usés, la température de la barrière ouvragée en argile gonflante plus élevée à l'intrados qu'à l'extrados provoque dans un premier temps une faible migration de l'eau interstitielle qu'elle contient, vers l'extérieur. Après cette phase transitoire d'une dizaine d'années, la resaturation de l'argile gonflante peut se poursuivre jusqu'à atteindre un état proche de la saturation au bout de 70 ans environ [8]. Le gonflement de l'argile qui accompagne ce processus de resaturation conduit à refermer progressivement les jeux de part et d'autre de l'anneau d'argile. Comme pour les déchets C, le chemisage résiste à une mise en charge progressive.

● **Capacité d'action et durée possible de l'étape**

La conception du chemisage et la limitation de la corrosion dans l'alvéole grâce à son obturation par l'operculaire ou un capot d'étanchéité confèrent une grande souplesse à la gestion des colis stockés.

Ainsi, le chemisage reste intègre pendant une durée d'au moins deux ou trois siècles et vraisemblablement beaucoup plus longtemps, sans intervention de maintenance dans la partie utile de

¹³⁵ La faible corrosion dans l'alvéole pendant la phase d'échauffement ne modifie pas de manière significative l'épaisseur de ces jeux.

¹³⁶ Des dispositions constructives ont été prises pour limiter ces efforts localement dans la zone d'appui des colis sur le chemisage, par exemple par des patins favorisant le frottement colis/chemisage

l'alvéole et avec possibilité de maintenance en tête d'alvéole, où la corrosion est un peu plus marquée¹³⁷.

Comme pour les alvéoles de déchets B, le retrait des colis est possible avec des moyens comparables à la mise en place tant que le chemisage reste intègre. L'évaluation de la durée de stabilité de l'alvéole peut être précisée grâce à l'observation de la poussée du terrain sur le chemisage, ou du gonflement de l'argile gonflante pour les alvéoles de combustibles usés, associée à la mesure des déformations du chemisage et de la température dans le corps et en tête de l'alvéole. La maintenance possible des galeries d'accès et des ouvrages de liaison en lien avec leur observation garantit une accessibilité des alvéoles sur une durée pluriséculaire.

La mise en charge progressive du chemisage provisoire en tête d'alvéole pourrait avoir un impact sur la durée techniquement possible de cette étape avant mise en place du bouchon d'alvéole. En effet, lors du scellement de l'alvéole, il est envisagé, au stade actuel de la conception, de retirer ce tronçon de chemisage provisoire pour assurer un contact direct entre les argilites et l'argile gonflante du bouchon. Or, le serrage mécanique pourrait rendre plus difficile le retrait de ce tronçon. Dans l'état actuel des connaissances, ce phénomène, qui pourrait être suivi par l'auscultation, ne devrait pas avoir d'impact à l'échelle séculaire, compte tenu de l'épaisseur minimale des jeux techniquement réalisables (de l'ordre de 10 mm) (voir chapitre 5.2).

Si l'on souhaitait prolonger cette étape, des actions spécifiques seraient nécessaires notamment la reprise des colis pour une intervention sur les alvéoles.

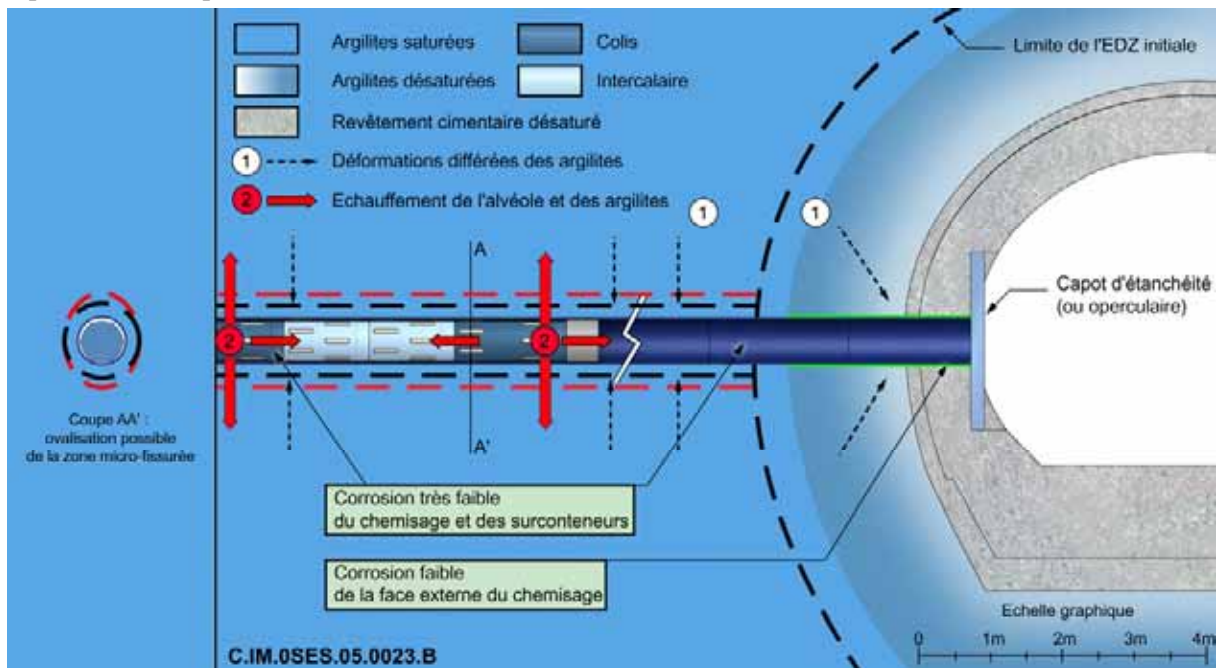


Figure 10.2.6 Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets C après mise en place des colis

¹³⁷ Uniquement, au droit de la zone de roche désaturée en paroi de la galerie d'accès ventilée.

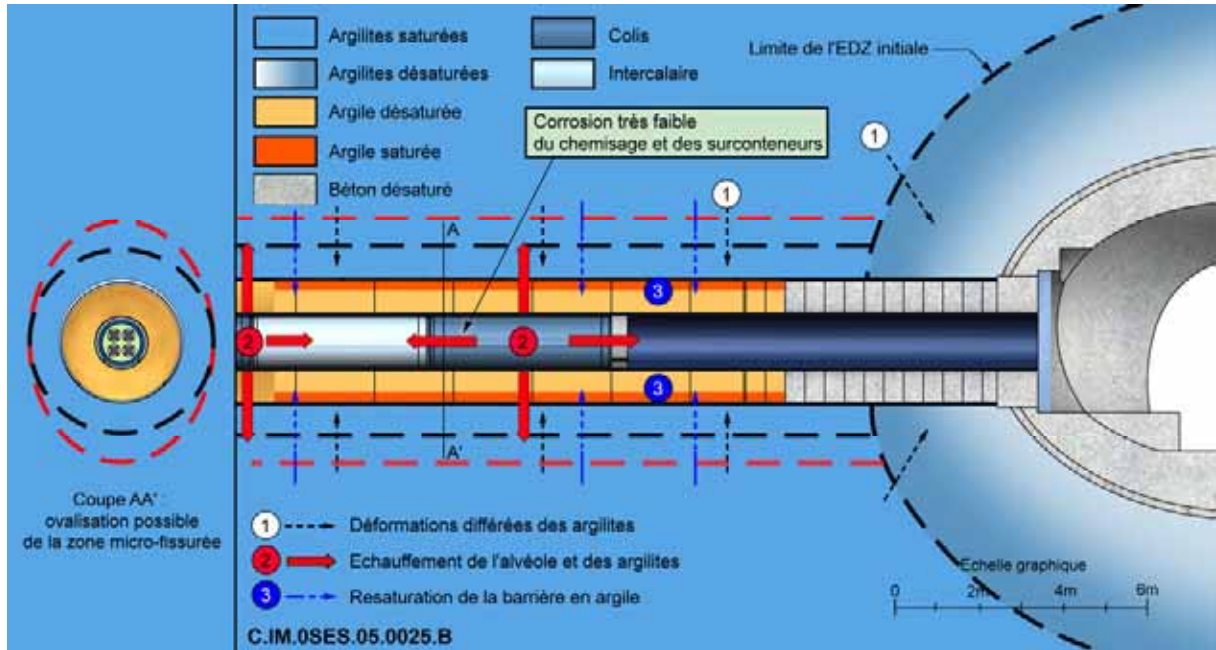


Figure 10.2.7 Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de combustibles usés après mise en place des colis.

10.2.2.2 Étape « après scellement des alvéoles »

La fermeture de l'alvéole consiste à retirer le chemisage provisoire et à mettre en place un bouchon argileux confiné par un bouchon de béton. La ventilation des galeries d'accès est maintenue et les têtes d'alvéole scellées sont toujours accessibles dans les mêmes conditions qu'à l'étape précédente (cf. section 10.2.2.1).

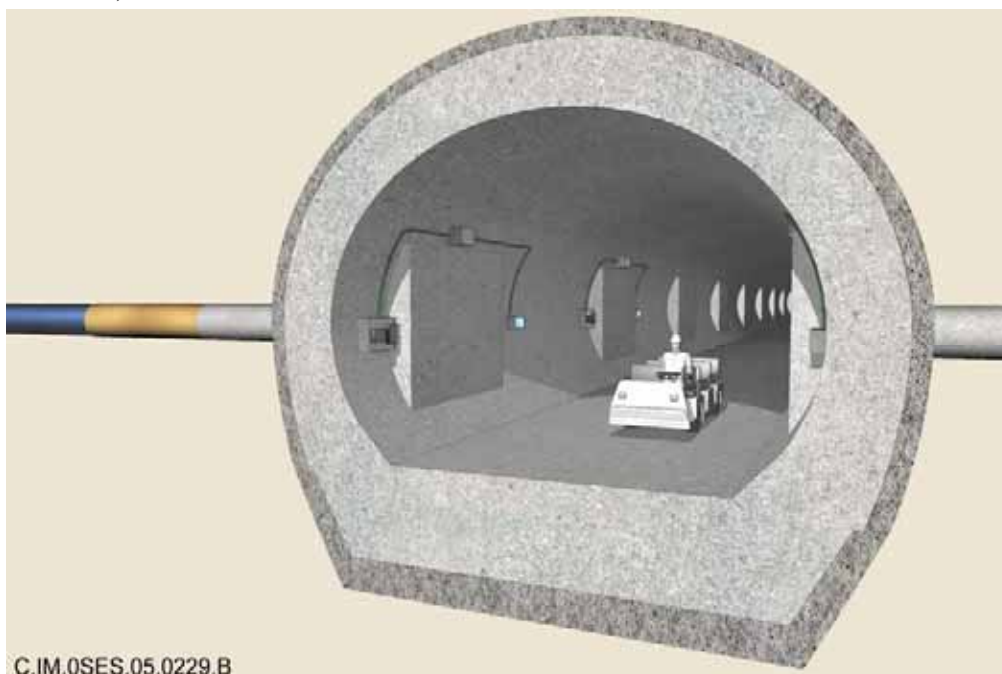


Figure 10.2.8 Accessibilité aux têtes d'alvéoles C après mise en place du scellement

Comme dans le cas des alvéoles B, la mise en place du scellement rend l'auscultation des alvéoles plus difficile. Cependant, il existe des techniques (notamment la technologie de transmission sans fil) permettant de continuer à suivre leur évolution (cf. section 10.3). Les galeries d'accès et de liaison

sont surveillées et font, si nécessaire, l'objet d'une maintenance (cf. §10.3.). Par ailleurs, le démantèlement du scellement et le retrait des colis restent techniquement possibles. (cf. §10.4.)

● **Évolution de l'alvéole**

La mise en place du scellement d'une alvéole nécessite de laisser l'alvéole ouverte pendant la durée des opérations (quelques jours). Cependant, la quantité d'oxygène apportée par le renouvellement partiel ou total de l'air dans l'alvéole est suffisamment faible pour ne pas induire de corrosion notable à l'intérieur du chemisage.

Après le scellement de l'alvéole, le bouchon joue le même rôle que l'operculaire d'exploitation ou le capot d'étanchéité vis-à-vis du renouvellement d'air. L'évolution du corps de l'alvéole et des colis qu'il contient se poursuit donc comme à l'étape précédente, sans variation significative due à la présence du bouchon en argile. La durabilité du chemisage et les conditions limitant la corrosion dans l'alvéole continuent à offrir une souplesse de gestion des colis dans l'alvéole. En outre, l'épaisseur des surconteneurs garantit le confinement des radionucléides, au moins pendant une durée millénaire pour les déchets C (4 000 ans) et pendant plus de dix mille ans pour les combustibles usés (voir chapitre 4).

En tête d'alvéole, le retrait du chemisage provisoire permet aux argilites de se déformer et de fermer progressivement les jeux de mise en place du scellement d'alvéole. Ensuite, dès sa mise en place, le scellement est soumis à l'échauffement provenant des déchets : sa face interne se met rapidement en équilibre thermique avec le colis le plus proche, alors que la face externe est en équilibre thermique avec la roche en paroi de la galerie d'accès, qui est ventilée [10], [13].

Le bouchon en argile gonflante et le massif d'appui en béton, qui ferment l'alvéole, provoquent de manière transitoire une légère désaturation de la roche en paroi puis se resaturent très lentement, en plusieurs décennies, de la périphérie vers le cœur du bouchon d'argile [8]. Pour les alvéoles de combustibles usés, le bouchon argileux, qui est placé à l'intérieur d'anneaux d'argile gonflante partiellement saturés, se resature encore plus lentement que dans les alvéoles de déchets C où il est placé directement en contact avec la roche saturée. Au fur et à mesure que l'argile se resature, elle gonfle et remplit les vides résiduels puis elle exerce une pression mécanique sur les matériaux environnants (roche, bouchon métallique et massif d'appui en béton), avec lesquels elle se met en équilibre mécanique.

Tant que la galerie d'accès est ventilée, le massif d'appui en béton situé à l'entrée de l'alvéole (de déchets C ou de combustibles usés) reste désaturé sur toute l'épaisseur de roche déjà désaturée en paroi de la galerie, sans que cela ait d'impact significatif sur la cinétique de resaturation du bouchon argileux, ni sur la température au sein des alvéoles.

À l'intérieur de l'alvéole, l'évolution du chemisage et des colis est très lente comme à l'étape précédente. Le chemisage reste intègre et les jeux fonctionnels perdurent.

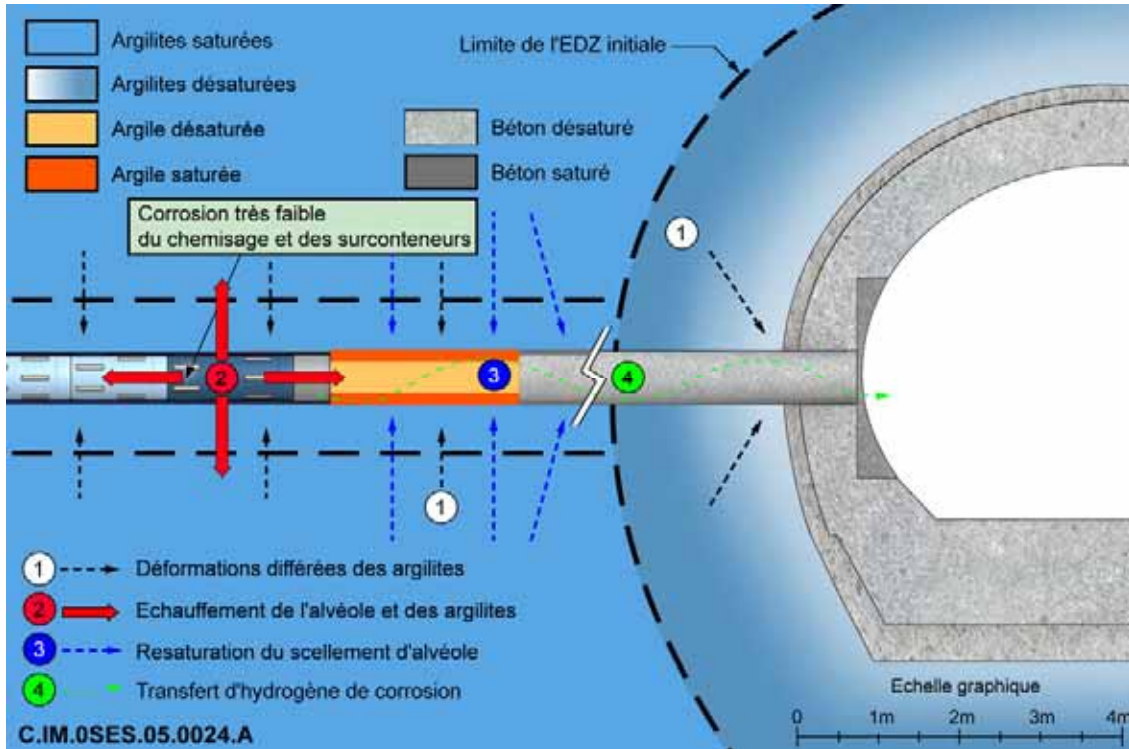


Figure 10.2.9 Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets C sans argile gonflante après scellement

● Capacité d'action et durée possible de l'étape

À cette étape, un retrait des colis peut encore s'effectuer de manière relativement simple tant que le chemisage est géométriquement intègre, soit au moins 200 à 300 ans depuis sa mise en place. La poursuite de l'observation de la poussée du terrain sur le chemisage et, dans la mesure du possible, des déformations du chemisage dans quelques alvéoles témoins permet de réévaluer la durée de vie du chemisage indépendamment de la fermeture ou non de ces alvéoles.

Cependant, le niveau de réversibilité a diminué à cette étape, car le scellement des alvéoles rend plus complexes les opérations de retrait. Le retrait des colis nécessite le rééquipement de la tête d'alvéole, dont la faisabilité technique est décrite à la section 10.4. Le volume à déblayer pour enlever le bouchon d'argile et son massif de béton n'est que de quelques mètres cubes de matériau par alvéole.

Le maintien de la ventilation dans les galeries d'accès n'a pas d'impact notable sur l'évolution des alvéoles et de leur bouchon, ni sur la garde d'argilites peu perturbées de part et d'autre du stockage, vis-à-vis de la sûreté à long terme. La durée techniquement possible d'un maintien du stockage à cette étape, avant remblaiement des galeries d'accès, renvoie alors à la durabilité des revêtements des galeries et à leurs possibilités de maintenance, envisageables sur plusieurs siècles (voir section 10.2.3)

Enfin, compte tenu du grand nombre d'alvéoles dans chaque module de stockage, la fermeture des alvéoles n'est pas nécessairement synchrone pour toutes les alvéoles d'un même module ; ainsi, la fermeture des premières alvéoles contribue à enrichir le retour d'expérience industriel sur la mise en place du scellement.

10.2.2.3 Étape « après fermeture d'un module »

La fermeture d'un module consiste à un remblaiement des galeries d'accès aux alvéoles. La ventilation des galeries de liaison est maintenue.

● **Évolution des alvéoles et des galeries d'accès**

La fermeture des galeries d'un module n'a pas d'impact notable sur le comportement des alvéoles. Cette étape se caractérise principalement par une évolution des galeries remblayées et des massifs d'appui en béton en têtes d'alvéoles, du fait de l'arrêt de la ventilation et de la mise en place de matériaux de remplissage.

Cette évolution se manifeste d'abord par le réchauffement du matériau de remblai au contact du revêtement et par une homogénéisation progressive de la température dans le module de stockage : en quelques siècles, la température atteint environ 50 °C pour les déchets C fortement exothermiques [10].

La resaturation de la galerie est très longue. Une phase transitoire de quelques dizaines d'années, qui retarde d'autant la resaturation, est nécessaire pour mettre en équilibre hydrique le remblai avec le revêtement et la roche en paroi. Bien que l'échauffement accélère les flux d'eau interstitielle, la resaturation du remblai nécessite au moins plusieurs dizaines de milliers d'années [8].

Le revêtement des galeries remblayées, dont la maintenance ne peut plus être assurée, se dégrade très lentement, principalement du fait de la corrosion anoxique des armatures ou des cintres par les faibles quantités d'eau venant de la roche. Ainsi à l'échelle du siècle après remblaiement, l'évolution du remblai et du revêtement de la galerie reste très limitée.

● **Capacité d'action et durée possible de l'étape**

Cette étape est plus caractérisée par la réduction d'accessibilité aux colis du fait du remblaiement des galeries que par l'évolution phénoménologique du module. Le retrait éventuel des colis reste toujours possible de manière relativement simple tant que le chemisage des alvéoles est intègre (au moins 200 à 300 ans après sa mise en place). Le niveau de réversibilité a diminué de par l'ampleur des travaux à réaliser pour accéder aux colis : le volume à déblayer est environ cent fois plus important qu'à l'étape précédente.

Sur des durées supérieures à la durée de vie du chemisage, le retrait des colis pourrait encore être réalisé à l'aide de moyens spécifiques (les conteneurs de stockage ayant une durée de vie de plusieurs milliers d'années).

L'observation de l'évolution des galeries remblayées porte principalement sur l'état de saturation des remblais et scellements, leurs déformations ou gonflements éventuels, les efforts dans les revêtements et la poussée du terrain. Ces informations permettent de préciser avant toute décision éventuelle de retrait, les conditions dans lesquelles s'effectueraient le déblaiement et donc les moyens à mettre effectivement en œuvre pour remettre en état les galeries d'accès.

La durée techniquement possible de cette étape relève de la durabilité et de la maintenabilité des galeries et des puits de liaison (plusieurs siècles).

10.2.3 Le comportement des ouvrages d'accès à l'étape « après fermeture d'une zone de stockage »

La fermeture des galeries de liaison secondaires (à l'intérieur des zones de stockage) diminue le niveau de réversibilité. En effet, l'accès aux colis devient de plus en plus difficile, même s'il existe des solutions techniques pour déblayer les galeries (voir section 10.4). Pour les zones de stockage de déchets B, le remblaiement des galeries de liaison secondaires ne réduit que faiblement l'accessibilité, car le volume à déblayer est de l'ordre de 20 000 à 30 000 m³. En revanche, la fermeture des zones de stockage de déchets C (ou de combustibles usés) réduit fortement l'accessibilité aux colis. Le volume à déblayer pour accéder aux alvéoles s'accroît d'un facteur 5 par rapport à l'étape précédente.

L'évolution des alvéoles et modules de stockage est très peu influencée par la fermeture d'une zone de stockage. L'évolution des galeries de liaison remblayées et scellées dans ces zones est très lente comme décrit précédemment pour les galeries d'accès aux alvéoles de déchets C (ou de combustibles usés), voire plus lente car elles subissent un échauffement moindre. Les scellements placés dans les

galeries se comportent comme les scellements d'alvéoles de déchets B. Ils ne sont pas resaturés même en périphérie avant plus de mille ans. La resaturation de la roche en contact avec ces scellements et des saignées argileuses éventuelles est également très lente et d'autant plus lente (à l'échelle d'un à plusieurs millénaires) que la ventilation a été maintenue longtemps [8]. Cette lente resaturation limite également la dégradation chimique du revêtement en particulier par corrosion ou hydrolyse. L'absence d'évolution notable des ouvrages après fermeture pendant plusieurs décennies, voire plusieurs siècles, facilite ainsi un éventuel retour en arrière, pour démanteler un scellement ou pour retirer des colis.

Les galeries de liaison principales encore accessibles peuvent être laissées en l'état sans limitation de durée du fait de la conception de leur revêtement, du maintien de la ventilation et surtout grâce à la possibilité de maintenance de ces installations. Ce maintien en l'état n'augmente pas de manière significative les perturbations induites dans la roche au droit des futurs scellements. En effet, la zone de roche microfissurée et éventuellement fracturée par le creusement en paroi d'alvéole ne s'étend pas. Au contraire, les fissures tendent à être comprimées par les déformations différées des argilites bloquées par le revêtement [66]. La roche est notablement désaturée par l'air sec ventilé, là où elle est microfissurée et éventuellement fracturée. Le maintien de la ventilation pendant une centaine d'années ou plus n'induit qu'une très faible désaturation au-delà, dans la roche non fissurée (taux de saturation supérieur à 95 %), sans impact sur l'état de la roche, mais qui contribue à freiner la resaturation ultérieure (Figure 10.2.10).

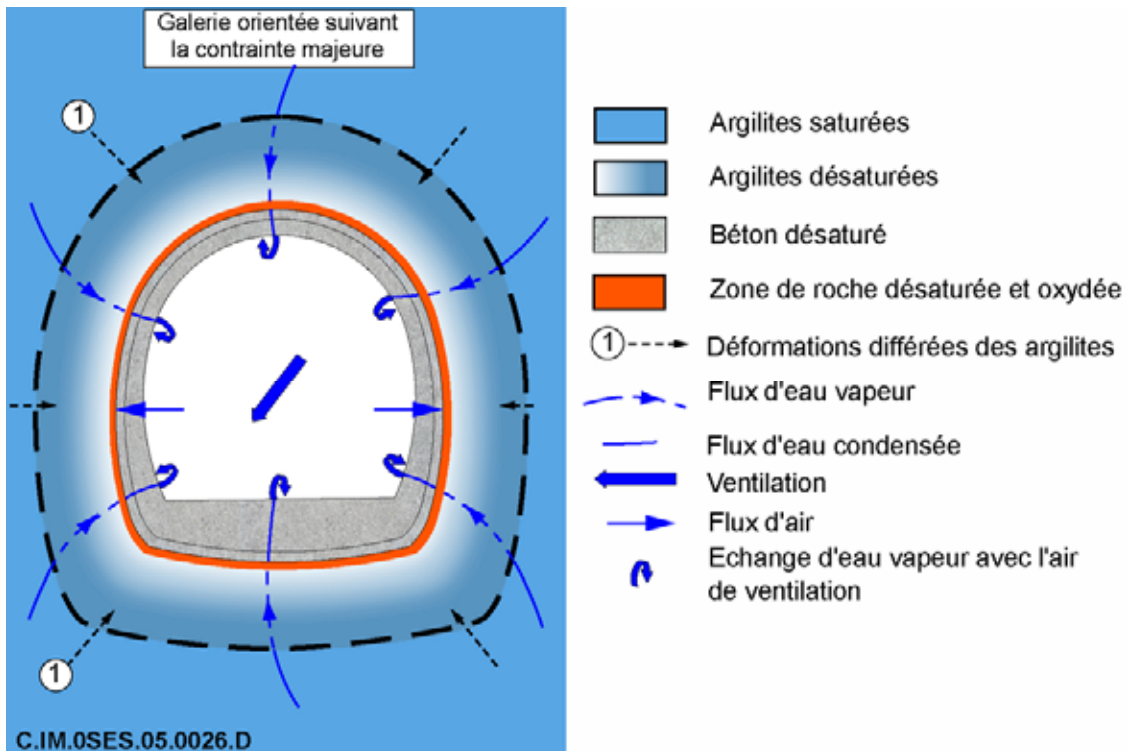


Figure 10.2.10 Représentation schématique des principaux phénomènes autour d'une galerie de liaison suivant son orientation à l'échelle d'un siècle

Comme pour les galeries d'accès aux alvéoles, le maintien de la ventilation dans les puits n'augmente pas l'extension de la zone de roche microfissurée qui apparaît en paroi lors de leur construction, ni la zone d'argilites significativement désaturée (moins de 90 % de degré de saturation) par plusieurs décennies de ventilation. Cet aspect est particulièrement important au droit des futurs scellements de puits.

Le revêtement des puits, conçu comme les autres ouvrages du stockage pour être stable pendant au moins un siècle [86], et leur maintenance associée à leur surveillance permettent d'assurer la stabilité des puits pendant toute la durée de leur ouverture, même si cette ouverture dure plusieurs siècles.

Pour ce faire, l'observation des galeries de liaison et des puits s'attache à suivre l'évolution des déformations différées des argilites en paroi, l'extension de la zone désaturée et les contraintes au sein des revêtements.

Les puits drainent la roche environnante dès leur construction. L'impact de ce drainage est surtout marqué dans les calcaires de l'Oxfordien où il s'étend rapidement en quelques années à toute la zone des puits et atteint une extension d'ordre kilométrique au bout d'un siècle. Cette dépression dans l'Oxfordien peut induire une faible baisse de pression interstitielle (d'ordre métrique) dans les argilites au bout d'un à plusieurs siècles, sans que cela ne modifie les propriétés des argilites. Le maintien de la ventilation dans les puits sur une durée de plusieurs siècles n'accentue pas notablement les perturbations hydrauliques induites pendant plusieurs décennies voire un siècle.

10.2.4 Conclusion sur la durée minimale de la gestion réversible du processus de stockage

Tout au long du processus de stockage, la stabilité mécanique des alvéoles de stockage conditionne la plus ou moins grande difficulté des opérations de retrait éventuel des colis.

La conception du revêtement des alvéoles de déchets B et du chemisage des alvéoles de déchets C (ou de combustibles usés) leur confère une stabilité mécanique pendant 200 à 300 ans sans maintenance particulière, et pratiquement indépendamment du franchissement des étapes de fermeture. Compte tenu des marges de dimensionnement, les alvéoles devraient en fait être stables plus longtemps encore. L'observation de ces ouvrages permettrait de réévaluer régulièrement leur durée de vie. Pour prolonger au-delà la durée possible de retrait des colis, des travaux spécifiques (maintenance renforcée par exemple) seraient nécessaires, pouvant impliquer un retrait temporaire des colis qui y sont stockés. La complexité de ces travaux croît à mesure du franchissement des étapes de fermeture, car cela implique la réouverture de parties scellées pour accéder aux alvéoles.

La durée de stabilité du revêtement des ouvrages d'accès (galeries et puits) peut quant à elle être accrue par des travaux de maintenance tant qu'ils sont accessibles. Elle est, comme pour les alvéoles, d'au moins plusieurs siècles. Les mesures in situ effectuées durant leur ouverture et éventuellement après leur fermeture permettraient là encore de préciser cette durée.

On considèrera que le terme ultime en matière de gestion réversible du processus de stockage est la rupture mécanique du revêtement des alvéoles. En effet, au-delà de cette borne, le retrait des colis bloqués par la formation géologique nécessiterait la mise en œuvre simultanée de moyens miniers et nucléaires. Bien que techniquement possible (retour d'expérience de certains gisements riches en uranium), leur mise en œuvre caractérise un faible niveau de réversibilité.

Une durée de deux à trois siècles constitue donc la durée minimale pendant laquelle le processus par étapes peut être géré de façon réversible sans nécessiter d'opérations lourdes d'un point de vue technique. Concrètement cela signifie que, quel que soit le niveau de fermeture du stockage, le retrait des colis d'une alvéole peut se faire, après rétablissement de l'accès à l'alvéole, avec des moyens de manutention comparables à ceux utilisés pour leur mise en place. Pour prolonger cette durée, il serait nécessaire, d'un point de vue technique, d'adopter des mesures spécifiques (maintenance renforcée, confortement d'ouvrages, reconstruction...).

10.3 L'observation et la surveillance

Cette section présente tout d'abord les motivations principales de l'observation et de la surveillance d'un stockage, ainsi qu'un aperçu des réflexions menées sur ce sujet au niveau international. Elle met en exergue l'apport de l'observation dans la gestion réversible. Elle identifie ensuite les contraintes principales spécifiques au stockage. Elle expose également le retour d'expérience industriel de l'observation des grands ouvrages et les technologies disponibles. Elle propose enfin des systèmes d'auscultation adaptés au stockage de déchets radioactifs qui seront ultérieurement enrichis par les acquis du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne [87].

10.3.1 Pourquoi observer et surveiller ?

La motivation générale de l'observation et de la surveillance est de fournir des outils de pilotage du processus de stockage. En effet, le suivi de l'évolution des ouvrages et de la roche hôte affinera à terme la connaissance et renforcera la confiance dans la maîtrise de ce processus.

En aucun cas ce suivi ne vise à se substituer aux étapes préliminaires d'acquisition de connaissance, notamment par la poursuite d'expérimentations en laboratoire souterrain. Au contraire, la mise en œuvre de l'auscultation dans le stockage pourra bénéficier du retour d'expérience acquis dans le laboratoire souterrain. L'existence d'un programme d'observation et de surveillance pendant l'exploitation du stockage ne peut pas non plus être invoqué pour pallier un manque de données éventuelles dans les évaluations de sûreté qui précéderaient toute autorisation de stockage.

10.3.1.1 Aperçu des principales motivations

L'observation et la surveillance du stockage répondent à trois motivations principales : (i) aider à la gestion réversible du stockage, (ii) contribuer à la maîtrise de la sûreté opérationnelle et à long terme (iii) apporter des informations complémentaires en termes de reconnaissance géologique.

Le terme « observation » correspond au premier objectif (aider à la gestion réversible). Le terme « surveillance » correspond au deuxième objectif (contribuer à la maîtrise de la sûreté). Il est à noter que les mesures mises en œuvre dans le cadre de la surveillance sont pour l'essentiel les mêmes que celles qui aident à la gestion réversible du stockage. Cette distinction n'est motivée que par la manière d'exploiter ces mesures.

10.3.1.2 Aider à la gestion réversible du stockage

L'observation du stockage permet de suivre les principaux phénomènes représentatifs des étapes successives du processus de stockage, renforce la compréhension du stockage et contribue de ce fait à sa gestion réversible. Elle permet en effet de caractériser l'évolution des ouvrages et de la formation géologique pendant la phase d'exploitation à partir d'un état initial connu. Les informations qu'elle apporte constituent des éléments importants lors de la prise de décisions. À titre d'exemple, l'observation renseigne l'exploitant sur la température atteinte dans les alvéoles, sur l'état de corrosion des composants métalliques ou le niveau de contraintes engendré par la formation géologique sur les revêtements. Ces éléments contribuent (i) à évaluer la pertinence du passage d'une étape à la suivante, (ii) à évaluer la capacité à récupérer les colis, (iii) à préparer une éventuelle évolution de la conception des prochains ouvrages à construire notamment en termes de dimensionnement géotechnique.

10.3.1.3 Contribuer à la sûreté opérationnelle et à long terme

La surveillance du stockage vise à détecter des évolutions qui pourraient agir sur des fonctions de sûreté opérationnelle ou à long terme. Elle permet de renforcer la maîtrise des modèles et des paramètres intervenant dans l'évaluation de la performance à long terme.

En termes de sûreté opérationnelle, elle vise à prévenir le développement de situations dangereuses, pour protéger les personnes et l'environnement. À titre d'exemple, elle renseigne sur les conditions ambiantes dans les ouvrages (gaz, poussières, température), le contrôle de non-dissémination radioactive ainsi que la tenue mécanique et la stabilité dimensionnelle des ouvrages. Cependant, cet aspect classique de l'exploitation d'installations nucléaires ne sera pas développé en détail dans le présent chapitre.

En termes de sûreté à long terme, la Règle Fondamentale de Sûreté n° III.2.f ([2] - Annexe 1) recommande l'instrumentation du stockage¹³⁸. De manière générale, il s'agit de confirmer l'existence de conditions propices à la sûreté à long terme. Pour ce faire, les mesures effectuées visent à s'assurer

¹³⁸ « Compte tenu de l'étalement dans le temps de la période d'exploitation du stockage et des perturbations induites durant cette période, il apparaît indispensable de prévoir une instrumentation adaptée pour le suivi de l'évolution des paramètres relatifs au site et aux ouvrages. Cette instrumentation devra être mise en place dès que possible, de façon à assurer un suivi des ouvrages et du site non seulement pendant, mais aussi avant la période d'exploitation du stockage. » (Extrait)

que l'évolution à court et moyen terme des ouvrages et de l'argilite voisine, reste dans un domaine compatible avec les évolutions ultérieures sur le long terme telles que prévues dans les modèles. La surveillance apporte ainsi des informations sur le respect des limites de température, l'état à court terme de la zone d'argilites endommagée autour des ouvrages et son évolution à moyen terme, la corrosion des conteneurs de stockage de déchets C ou de combustibles usés, la détection d'éventuelles interactions chimiques entre les matériaux (bétons, argilite, argiles gonflantes des scellements). Les données ainsi acquises permettent de confirmer les données « initiales » prises en compte dans les simulations d'évolution à long terme.

En aucun cas il ne s'agit ici de faire reposer l'évaluation de sûreté d'un stockage sur sa surveillance. En revanche, conformément aux pratiques des installations nucléaires existantes, les informations tirées de la surveillance permettraient une tenue à jour du référentiel de sûreté, introduisant la possibilité d'un réexamen périodique.

10.3.1.4 Apporter des informations géologiques complémentaires

La reconnaissance de la roche à l'avancement (c'est-à-dire au fur et à mesure de la construction des ouvrages) constitue le troisième objectif de l'observation et de la surveillance. Elle vient en complément des connaissances détaillées, déjà acquises avant le début de la construction du stockage qui ont permis d'accéder aux caractéristiques de la formation du Callovo-Oxfordien sur le site du laboratoire de recherche souterrain et sur le secteur d'étude (voir la section 2.2).

Cependant, malgré cet acquis, une reconnaissance à l'avancement complémentaire permet d'accéder à une connaissance plus précise de l'état initial et des propriétés de la roche à l'endroit prévu pour la construction des ouvrages. Cet état initial constitue une référence pour les évolutions futures, que l'on cherche à observer et à modéliser, pendant l'exploitation des ouvrages.

En outre, cette reconnaissance préalable permettra de confirmer l'absence d'hétérogénéités ou d'éventuelles singularités. En effet, le dimensionnement des ouvrages et l'évaluation de sûreté se réfèrent à l'homogénéité des propriétés de la roche hôte, c'est-à-dire à une variation relativement faible et bien connue de ces propriétés. Si la reconnaissance à l'avancement détectait des variations plus importantes que celles déjà connues, il conviendrait d'en tenir compte dans les modèles, et éventuellement d'ajuster localement la conception des ouvrages. Il faudrait aussi, le cas échéant, adapter la répartition des moyens d'observation à de telles variations (voir infra, section 10.3.6).

La reconnaissance préalable au droit des ouvrages est donc un outil indispensable à une bonne mise en œuvre de l'observation du stockage.

10.3.2 Les paramètres à observer pendant l'exploitation du stockage

Les paramètres à observer au cours des différentes étapes du processus de stockage sont ceux qui permettent de suivre et de quantifier les différents phénomènes auxquels sont subordonnées une éventuelle opération de retour en arrière ainsi que la possibilité de maintenir l'installation en l'état (voir section 10.2.). Le suivi de l'évolution de ces phénomènes apporte à l'exploitant les informations requises pour mieux gérer le stockage dans une logique de réversibilité et contribue à la sûreté opérationnelle et à long terme.

10.3.2.1 Observation des alvéoles de déchets B

Il a été vu précédemment que le niveau de réversibilité des alvéoles B est essentiellement subordonné à la stabilité mécanique de la structure de l'alvéole. Le premier objectif de l'observation de ces ouvrages est en conséquence lié à l'évaluation des paramètres qui témoignent de cette stabilité et qui permettent d'apprécier sa durabilité. Dans ce but, l'observation doit concerner le niveau de contrainte induit sur le revêtement par la formation géologique et les éventuelles déformations dont pourrait être affecté le revêtement. De plus, le niveau de contrainte induit par la formation géologique étant lié à l'état de saturation de l'environnement proche, ce dernier paramètre doit également faire l'objet d'un suivi.

Le deuxième objectif est lié à la production de gaz, car un retrait éventuel des colis nécessite la connaissance de la composition de l'atmosphère de l'alvéole. Dans ce but, le programme d'observation doit comprendre une analyse des gaz contenus dans l'alvéole (notamment de l'hydrogène).

Enfin, le troisième objectif de l'observation des alvéoles B est lié à l'exothermicité, bien que faible, de certains déchets B. En effet, la connaissance de la température est importante non seulement pour comprendre l'évolution des différents phénomènes mais également pour apprécier les conditions d'une opération éventuelle de retrait des colis. L'évolution de la température dans les différentes composantes de l'alvéole constitue donc également un élément du programme d'observation des alvéoles B.

10.3.2.2 Observation des alvéoles de déchets C et de combustibles usés

Le niveau de réversibilité des alvéoles de déchets C et de combustibles usés est subordonné à la stabilité mécanique du chemisage métallique qui contient les colis de stockage et à son état de corrosion. En conséquence, le programme d'observation de ces alvéoles est essentiellement orienté sur les paramètres qui témoignent de l'état du chemisage mais également sur ceux qui permettent d'expliquer et de prédire son évolution.

Ces paramètres correspondent aux phénomènes conjoints et couplés qui déterminent les conditions physiques du chemisage de l'alvéole à savoir :

- l'évolution thermique de l'alvéole et de son environnement ;
- l'évolution du niveau de contraintes induit par la formation géologique sur le chemisage et les déformations éventuelles qui pourraient en découler ;
- l'évolution de la composition de l'atmosphère de l'alvéole (notamment la teneur en oxygène) et de son hygrométrie ;
- l'évolution du niveau de saturation de l'environnement proche de l'alvéole.

10.3.2.3 Observation des puits et des galeries

Dans le cas des ouvrages d'accès (puits et galeries), l'objectif de l'observation est d'abord orienté sur la stabilité mécanique des revêtements. En conséquence, comme dans le cas des alvéoles de déchets B, le programme d'observation de ces ouvrages s'attache aux paramètres qui témoignent de cette stabilité. Ces paramètres sont liés au déconfinement initial de la roche hôte, à l'évolution de l'état de saturation du champ proche, au niveau de contraintes induites par la formation géologique sur le revêtement et aux déformations qui peuvent en découler.

En outre, un intérêt particulier est porté aux emplacements des futurs scellements. Dans ce but, l'observation vise à évaluer la formation et l'évolution d'une éventuelle zone endommagée dans la formation géologique.

10.3.3 Situation au niveau international

Des réflexions sur l'observation et la surveillance d'un stockage ont été menées au plan international sous l'égide, respectivement, de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) [88], de l'Agence de l'Énergie Nucléaire (AEN) de l'Organisation pour la Coopération et le Développement Economiques [89], et de la Commission de l'Union Européenne [90]. Elles montrent que les principales motivations présentées ci-dessus sont largement partagées par les organismes concernés dans différents pays.

Cependant, la traduction technique de ces motivations reste spécifique à chaque organisme, car elle doit s'adapter au contexte national et notamment à la stratégie retenue en la matière [90]. Notamment la question du lien entre la réversibilité et l'observation du stockage, et d'une façon plus générale la question de la réversibilité sont abordées avec des nuances d'un pays à l'autre.

● Réflexions au sein d'organismes internationaux

Dans sa définition du « monitoring¹³⁹ » (i.e. « observations et mesures périodiques ou continues, de paramètres d'ingénierie, d'environnement ou radiologiques »), l'AIEA en précise l'objectif : « aider à l'évaluation du comportement des composants d'un système de stockage ou de l'impact de la présence ou de l'exploitation du stockage sur l'environnement » [88].

Le monitoring se justifie alors comme une aide à la prise de décision. L'accumulation d'informations acquises, depuis la construction et pendant l'exploitation du stockage, permettrait de vérifier, affiner ou au besoin modifier la conception du stockage. Ces informations permettraient aussi d'évaluer la capacité à récupérer les colis. L'AIEA indique enfin que l'auscultation contribuera à augmenter les connaissances liées à l'évaluation de la sûreté à long terme.

Un groupe de travail sous l'égide de la Commission de l'Union Européenne [90] s'est appuyé sur la définition proposée par l'AIEA. Il a développé notamment la place du « monitoring » dans la mise en œuvre d'un stockage par étapes successives.

L'AIEA a aussi, plus récemment, introduit l'avancement par étapes du stockage dans son approche de l'observation [91].

Enfin, l'AEN [16] considère également que l'auscultation de divers paramètres du stockage et du site apporte des informations liées à l'évaluation de sûreté. Elle suggère un réexamen périodique du référentiel de sûreté à la lumière de ces informations. Ces dernières pourront concerner une confirmation des propriétés du site, la réponse du site à la présence du stockage et un début de l'évolution des ouvrages du stockage.

● Situation au Canada

L'EACL¹⁴⁰ a examiné en 1997 les méthodes de « monitoring » d'un stockage de combustibles usés¹⁴¹[92]. Le domaine couvert est vaste ; il va de la surveillance des ouvrages de confinement et de l'environnement, jusqu'au suivi des retombées socio-économiques.

Pour minimiser les interférences éventuelles entre les moyens d'auscultation et l'exploitation, et pour éviter tout impact sur le fonctionnement des barrières ouvragées, EACL propose de réaliser dans le stockage une zone expérimentale en complément de la surveillance directe de l'évolution du stockage pendant la construction et l'exploitation, et éventuellement pendant une période à durée indéterminée avant la fermeture du stockage. Cette zone permettrait de réaliser des expérimentations in situ sur une longue durée, notamment des expérimentations liées au comportement à long terme des matériaux (par exemple la corrosion) et aux performances des barrières hydrauliques.

¹³⁹ Terme anglais correspondant à l'auscultation

¹⁴⁰ Commission de l'Énergie Atomique du Canada

¹⁴¹ Pour mémoire, les combustibles usés à gérer au Canada proviennent de la filière nationale de réacteurs CANDU, fonctionnant à l'uranium naturel. Ils se caractérisent par un faible taux de combustion, et, corollairement, par un dégagement thermique nettement inférieur aux combustibles types CUI ou CU2 français. En revanche, les volumes considérés sont importants.

EACL s'appuie essentiellement sur des moyens techniques existants, ou qui paraissent pouvoir être facilement déduits des techniques existantes.

● **Situation aux États-Unis**

La démarche de développement d'un stockage par étapes (« adaptive staging ») proposée par le National Research Council (NRC) [21] peut être rapprochée de l'approche de la réversibilité présentée par l'Andra, dans laquelle un éventail de choix est offert en matière de gestion à chaque étape du processus (voir la section 10.2). Toutefois, elle s'en distingue par sa finalité plus technique que répondant à une demande sociale ou politique.

La démarche proposée par la NRC est accompagnée d'un programme d'auscultation des barrières manufacturées et naturelles. Diverses motivations sont évoquées, qui rejoignent celles présentées aux paragraphes précédents : la caractérisation de l'état initial, l'analyse des performances réelles du système et des ouvrages, le soutien aux prises de décisions, notamment celles portant sur l'amélioration du système, la vérification du respect des exigences, la protection des personnels, le contrôle des matières nucléaires. Le NRC insiste sur l'inscription de la démarche proposée dans une gestion responsable, qui permettrait d'augmenter la confiance des parties prenantes.

Le projet de Yucca Mountain (dédié aux combustibles usés civils et de défense) illustre bien cette logique. Ce projet est caractérisé par une auscultation adaptée à la spécificité du concept. En effet, ce projet peut être qualifié d'entreposage souterrain ventilé transformable en stockage. Pendant une première phase de 70 ans, il doit être géré comme un entreposage. Les observations réalisées pendant cette période seront des éléments essentiels sur lesquels les décideurs fonderont leur choix futurs [69].

Le programme d'auscultation y est notamment considéré comme un élément important du programme de confirmation des performances d'un stockage. Ainsi, son objectif est de vérifier que les informations utilisées lors de la démonstration de sûreté étaient adéquates, et de démontrer que les ouvrages se comportent conformément aux attentes [89]. Il pourrait par ailleurs aider à augmenter la confiance ou à optimiser le stockage.

● **Situation en Suède**

L'organisme suédois en charge de la gestion des déchets radioactifs (SKB) étudie l'intégration d'activités d'observation et de surveillance dans le phasage de développement d'un stockage de combustibles usés [93].

SKB distingue une phase de caractérisation du site depuis la surface, une phase de construction des ouvrages centraux et des premiers ouvrages dédiés au stockage de colis, une phase de mise en place d'une première fraction (5 à 10 % environ) de l'inventaire à stocker suivie d'une phase dite industrielle (dédiée à l'ensemble de l'inventaire), puis une phase de fermeture.

SKB précise qu'au terme de chacune de ces phases, les données acquises par le monitoring pourront contribuer à une mise à jour de l'évaluation de la sûreté à long terme. La détection d'une évolution différente de celle attendue déclenchera d'abord une analyse de ces différences, puis une mise à jour des modèles, et éventuellement enfin une adaptation de la conception.

On notera que l'étude s'appuie entre autres sur le retour d'expérience du monitoring du stockage souterrain suédois de déchets de faible et moyenne activité (SFR), de l'entreposage souterrain de combustibles usés (CLAB), et des expérimentations effectuées dans le laboratoire de recherche souterrain d'Äspö.

● **Situation en Suisse**

Le Groupe d'experts pour les modèles de gestion des déchets radioactifs (EKRA), créé par le Conseil fédéral, a proposé un concept de « dépôt géologique durable contrôlé » [94]. Ce modèle « associe trois dépôts formant système : un dépôt test, un dépôt principal et un dépôt pilote », et inclut une période de « surveillance, contrôle et possibilité de récupération ». Le dépôt test sert de laboratoire souterrain spécifique au site, dont l'exploitation peut être poursuivie après la mise en service du dépôt principal.

Le dépôt principal est destiné à accueillir la majeure partie des déchets. Ses infrastructures (puits et galeries) sont maintenues accessibles pendant la phase d'observation.

Le dépôt pilote est destiné à accueillir une petite fraction des déchets et permet la surveillance du comportement des barrières techniques et la confirmation des modèles théoriques, pendant une durée pouvant aller au-delà de la fermeture du dépôt principal. « Sur la base des observations effectuées dans le dépôt pilote », des interventions dans le dépôt principal peuvent être décidées, y compris la récupération des déchets.

Ce concept d'un stockage observé a été retenu par la Nagra, l'organisme suisse de gestion des déchets [44]. Cette approche vise une interaction forte avec les parties prenantes, reposant notamment sur la présentation d'une démonstration de sûreté à chaque jalon de ce processus. Cette approche offre aussi la flexibilité de prendre en compte les connaissances acquises pendant le déroulement du processus. Elle permet par exemple d'adapter la conception, ou encore de revenir sur des décisions antérieures et éventuellement de récupérer les colis.

10.3.4 Contraintes spécifiques de l'observation d'un stockage

Les contraintes spécifiques de l'observation et de la surveillance d'un stockage géologique de déchets radioactifs par rapport à celles qui prévalent pour les grands ouvrages de génie civil sont essentiellement liées à la durée de vie recherchée pour les moyens d'auscultation ainsi qu'à leur « discrétion » c'est-à-dire leur non interférence vis-à-vis des phénomènes observés et des fonctions de sûreté.

On notera plus particulièrement qu'à ce stade des études, et en raison des contraintes décrites ci-dessous, il n'est pas envisagé d'instrumenter les colis de stockage afin d'éviter toute gêne en termes de manutention liée à la présence éventuelle de câbles ou capteurs proéminents.

10.3.4.1 Durée de vie des moyens d'auscultation et conditions d'environnement

Les moyens utilisés pour l'observation et la surveillance des ouvrages doivent donc être capables de fonctionner de façon fiable sur de longues durées (à l'échelle d'ordre séculaire).

En outre, dès que débutera la mise en place des colis, les alvéoles de stockage ne seront plus accessibles. Par conséquent, l'acquisition des mesures devra se faire à distance et il sera difficile de venir remplacer un capteur défaillant pendant ou après le remplissage des alvéoles. Il en est de même après remblaiement ou scellement des galeries. La répartition et le nombre de moyens de mesure doivent donc dans ces ouvrages tenir compte d'un certain taux de défaillance des capteurs, pour pouvoir disposer le plus longtemps possible de données suffisantes pour suivre l'évolution des ouvrages.

Les alvéoles présentent aussi pour la plupart des conditions d'environnement agressives en termes de rayonnement et de température vis-à-vis du bon fonctionnement des moyens d'auscultation. Les capteurs doivent donc être capables de fonctionner correctement jusqu'à une température proche de 100 °C dans les alvéoles C (et CU), et pouvant atteindre 60 °C dans le revêtement des alvéoles contenant des déchets B faiblement exothermiques.

Le fonctionnement des capteurs et en particulier de leurs composants électroniques peut aussi être perturbé par l'effet des rayonnements. En fonction des moyens disponibles, les capteurs seront choisis aussi peu vulnérables que possible aux effets des rayonnements et éventuellement placés dans l'alvéole de manière à minimiser ces effets.

D'autres conditions d'environnement ne sont pas spécifiques au stockage de déchets radioactifs, mais plutôt à la grande profondeur des ouvrages et aux faibles quantités d'eau contenues dans la roche (de telles conditions peuvent être rencontrées dans des tunnels routiers sous forte couverture). En particulier, des précautions doivent être prises lors de la mise en place des capteurs destinés à mesurer les fortes pressions interstitielles autour des ouvrages.

En revanche, les conditions dans les alvéoles limitent les pertes de capteurs par corrosion, fréquentes dans les tunnels routiers ou ferroviaires. En effet, les alvéoles B sont fortement désaturées dans le béton et en paroi de roche et l'air ventilé y est relativement sec. Dans les alvéoles C, la corrosion se produit principalement en conditions anoxiques et donc de façon très lente.

10.3.4.2 Discrétion des moyens d'auscultation

La « discrétion » des moyens d'auscultation mis en œuvre désigne leur aptitude à limiter la perturbation de l'objet ausculté à un niveau non significatif. Cette discrétion signifie usuellement que la mesure n'est pas influencée significativement par la présence des instruments. Dans le contexte du stockage, elle signifie également que la mise en œuvre des moyens d'auscultation ne doit pas avoir d'impact notable sur (i) les conditions d'exploitation, (ii) la tenue mécanique des ouvrages, (iii) les performances à long terme (en particulier les propriétés hydrauliques des scellements et de la roche). La « discrétion » est donc une contrainte importante à prendre en compte dans le développement d'un programme d'observation et de surveillance d'un stockage.

● **Absence d'impact significatif sur les conditions d'exploitation des ouvrages**

La mise en œuvre des moyens d'auscultation ne doit pas perturber l'exploitation. Ainsi, la mise en place des câbles de transmission ne doit pas gêner la mise en stockage des colis dans les alvéoles. Pour ce faire, ils pourront être intégrés dans le revêtement ou fixés sur la paroi excavée de la galerie ou de l'alvéole. Par ailleurs, la mise en œuvre du système d'auscultation veillera à éviter la production d'étincelles, notamment dans les alvéoles susceptibles de produire de l'hydrogène. Les éventuelles sources d'énergie, notamment des batteries permettant une transmission sans fil, sont plus particulièrement concernées par ce risque.

● **Absence d'impact significatif sur la tenue mécanique des ouvrages**

L'une des motivations des moyens d'auscultation est de fournir des informations en support à la gestion réversible du stockage. Ceci ne doit pas être obtenu au prix d'une dégradation de la réversibilité. À titre d'exemple, l'intégration des moyens d'auscultation dans les ouvrages ne doit pas conduire à une dégradation plus rapide de leur tenue mécanique ou de leur stabilité dimensionnelle. Ainsi, l'intégration de capteurs dans le béton, fréquemment pratiquée en génie civil, peut être mise en œuvre avec un impact négligeable sur la structure, compte tenu de la faible dimension des objets introduits.

● **Absence d'impact significatif sur les fonctions de sûreté attribuées aux ouvrages et sur les propriétés favorables du milieu géologique**

Les moyens d'auscultation doivent être mis en œuvre en s'assurant de l'absence d'impact sur la sûreté à long terme. Ceci concerne d'une part les évolutions irréversibles éventuellement engendrées par les moyens d'auscultation pendant l'exploitation du stockage, et d'autre part les conséquences de l'abandon d'une partie de ces moyens dans les ouvrages après leur fermeture.

En premier lieu, la zone de garde de roche hôte entourant un stockage ne doit pas être perturbée par la présence d'instruments. Les mesures effectuées dans les différents horizons du Callovo-Oxfordien seront donc soit non intrusives, soit situées dans le champ proche des puits et des ouvrages souterrains.

Le risque d'un impact chimique doit également être pris en compte. Il sera maîtrisé par le choix d'instruments de mesure en matériaux appropriés : les matériaux introduits (métaux, silices...) et leurs produits de corrosion éventuels sont semblables à ceux utilisés par ailleurs dans la construction des ouvrages. Aucune matière organique ne sera introduite dans le stockage, par exemple sous forme de fluides hydrauliques présents dans des cellules de pression. Le risque d'un impact sur l'évolution de l'EDZ en paroi des alvéoles dépend des vides éventuels que les moyens d'auscultation pourraient causer à long terme après leur dégradation complète. Or les volumes occupés par les instruments de mesure sont faibles par rapport au volume des jeux de construction des ouvrages et de mise en place des colis. Pour les mêmes raisons, la présence de moyens d'auscultation insérés dans une barrière

ouvragée ou dans un scellement ne compromet pas la capacité de gonflement et de remplissage des vides de l'argile qui les constituent.

Enfin, et surtout, la mise en œuvre des moyens de transmission des mesures nécessite une attention particulière pour éviter de dégrader éventuellement les performances hydrauliques du milieu géologique et des scellements. En effet, la présence de câbles ou de fibres optiques pourrait créer des courts-circuits facilitant l'écoulement de l'eau et le transfert de radionucléides. Trois approches sont envisageables à cet égard : éviter le passage de moyens filaires dès la construction d'ouvrages de scellement, tolérer ces moyens pendant une phase transitoire, puis remettre en l'état le scellement, ou contourner le scellement pendant une phase transitoire, puis sceller le forage latéral effectué à cet effet.

Éviter le passage de câble requiert soit un abandon des mesures situées en amont du scellement dès la construction de celui-ci, soit la mise en œuvre d'une transmission sans fil à travers le milieu géologique ou à travers un scellement. Cette dernière option constitue une piste intéressante de développement. Elle s'appuie notamment sur un retour d'expérience de l'exploitation pétrolière et a été mise en œuvre dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (sonde EPG). De plus, la faisabilité d'une transmission sans fil dans l'environnement spécifique des alvéoles de stockage fait l'objet d'un programme de recherche et de développement entre l'Andra et l'agence japonaise Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC). La question de la durée de fonctionnement doit en particulier être examinée.

Le passage temporaire de moyens filaires pourrait également être envisagé lors de la construction de scellements constitués de briques précompactées d'argile gonflante. Lors de la fermeture définitive, la remise en état s'effectuerait par une récupération des moyens filaires, par exemple par surcarottage, suivie du scellement du forage ainsi réalisé.

10.3.5 Retour d'expérience industriel en matière d'observation

L'observation et la surveillance constituent une pratique maintenant courante dans de nombreux secteurs d'activité tels que le domaine des grands ouvrages de génie civil, les centrales nucléaires, les exploitations minières ou pétrolières.

Or les ouvrages de stockage présentent des analogies avec certains types d'ouvrages de génie civil, bénéficiant déjà d'un retour d'expérience d'auscultation. L'instrumentation des puits, des galeries et des alvéoles de déchets B bénéficie principalement du retour d'expérience acquis pour les tunnels autoroutiers et ferroviaires, ainsi que de celui d'ouvrages en béton comme les barrages hydrauliques en béton ou les enceintes de confinement de centrales nucléaires. Pour les alvéoles de déchets C ou de combustibles usés, le retour d'expérience utilisé est celui de l'instrumentation de tronçons de pipeline, de canalisations ou de pieux de fondation. L'auscultation de barrages à noyau d'argile et de couvertures argileuses de stockage et les acquis des expérimentations de scellement et remblaiement en laboratoires souterrains fournissent enfin des enseignements pour l'auscultation des composants en argile (scellement, remblai, barrière ouvragée en argile gonflante le cas échéant) d'un stockage.

10.3.5.1 Retour d'expérience de l'auscultation des grands ouvrages de génie civil

Le retour d'expérience de la pratique de l'observation et de la surveillance montre l'intérêt de l'auscultation aussi bien en phase de construction [95] que d'exploitation des installations¹⁴². Il permet d'acquérir un savoir-faire sur la manière de concevoir, d'implanter et d'exploiter un système d'auscultation [96], [97]. Enfin, des moyens techniques ont ainsi pu être testés et éprouvés dans des conditions environnementales variées et sur des durées pouvant atteindre plusieurs décennies.

Dans le domaine des tunnels la pratique de l'auscultation est courante depuis dix à vingt ans, d'une part dans des tunnels anciens en vue de leur maintenance mais aussi dès la conception de nouveaux ouvrages. Ce retour d'expérience est très intéressant pour le stockage compte tenu de la similitude des ouvrages.

¹⁴² Il y a quelques décennies, la mise en œuvre de l'auscultation d'un ouvrage était encore assez souvent considérée comme une charge financière et technique sans apport suffisant en retour.

L'auscultation associée à la modélisation numérique est un outil d'aide au diagnostic de l'état des tunnels anciens. Elle permet de définir la nature des actions de confortement ou de mise aux normes actuelles. À titre d'exemple, cette approche est mise en oeuvre par Réseau Ferré de France pour la maintenance des nombreux tunnels ferroviaires, parfois plus que centenaires, qui sont encore en service [98].

Pour les tunnels plus récents, l'auscultation s'est imposée progressivement du fait des contraintes environnementales imposées en site urbain (creusement sous des constructions existantes et souvent dans des terrains meubles) et pour améliorer ou optimiser la conception des ouvrages. Dans les deux cas, l'auscultation permet de suivre les déformations du terrain et d'adapter éventuellement la méthode de creusement et de soutènement. Ce fut le cas par exemple pour la construction des ouvrages de la ligne ferroviaire EOLE (et METEOR) sous Paris ou pour le tunnel de Tartaignille, l'un des ouvrages souterrains les plus importants de la ligne du TGV Méditerranée, pour la traversée d'une zone de marnes. Dans le cas du tunnel autoroutier de Chamoise constitué de deux tunnels indépendants mis en service à une dizaine d'années d'intervalle (en 1986 et 1996), le suivi instrumental du premier ouvrage après sa construction a permis d'améliorer la conception du radier du deuxième tunnel. En outre, le suivi du comportement et de l'état de tels ouvrages pendant leur exploitation permet de détecter très tôt les besoins de maintenance.

Dans le domaine nucléaire, l'auscultation des enceintes de confinement des centrales nucléaires en béton précontraint a été prévue dès la construction de la première centrale (première tranche de la centrale de Fessenheim en 1971). L'auscultation adoptée concerne principalement la sûreté d'exploitation de l'installation nucléaire. Mais elle permet également d'avoir une connaissance de l'état physique du béton au cours de la vie de l'ouvrage. L'information ainsi acquise peut alors contribuer aux prises de décision concernant la gestion de la centrale, par exemple pour un prolongement de sa durée de vie.

Les barrages présentent un intérêt particulier vis-à-vis de la conception de l'observation du stockage. En effet, ils sont inspectés et surveillés de façon réglementaire depuis des décennies. L'amélioration des connaissances, des moyens d'auscultation et l'augmentation importante du nombre de barrages en France entre 1930 et 1970 a conduit en 1970 et 1983 à une révision de la circulaire de 1927. La réglementation impose ainsi une surveillance continue et complète de l'ouvrage et de sa fondation pendant sa mise en eau, une surveillance régulière (d'ordre hebdomadaire) par l'exploitant, une visite annuelle et une visite complète décennale du service de contrôle de l'administration [99]. Sur certains barrages, les capteurs fournissent ainsi des mesures depuis plusieurs décennies. Des outils d'analyse statistique des mesures d'auscultation ont également été développés depuis une vingtaine d'années pour aider l'exploitant à détecter d'éventuelles évolutions lentes susceptibles d'altérer le comportement de l'ouvrage [100] (par exemple gonflement du béton ou dégradation de l'étanchéité du noyau argileux). La mise en oeuvre de politiques de surveillance similaires dans de nombreux pays a permis de réduire au niveau mondial le taux de rupture de 2,2 % pour les barrages construits avant 1950 à 0,5 % pour les barrages construits entre 1951 et 1986 [101].

En outre, le souci de garantir la durée d'exploitation séculaire de grands ouvrages (immeubles de grande hauteur, ponts ou viaducs) conduit à mettre en oeuvre un suivi du comportement de ces ouvrages et surtout de leurs fondations. Ce suivi a pour objet de mesurer les déformations différées de la structure, de détecter d'éventuels tassements différentiels des fondations, qui pourraient être dommageables pour la structure, ou d'évaluer l'impact de travaux réalisés à proximité (par exemple l'auscultation du Ministère des Finances à Paris pendant la construction de la nouvelle ligne de métro n°14). À cet égard les pieux métalliques de fondation de certains de ces ouvrages font l'objet d'une auscultation toute particulière.

Pour mémoire, les expérimentations réalisées en laboratoires de recherche souterrains apportent un retour d'expérience assez différent de celui fourni par le génie civil. Ces installations, dédiées à la recherche scientifique, présentent l'intérêt d'avoir mis en oeuvre des moyens d'auscultation spécifiques aux roches étudiées pour le stockage profond et spécifiques aux phénomènes particuliers liés au stockage. Les acquis proviennent principalement des laboratoires en site argileux : à Mol en Belgique [102], à Mont Terri en Suisse et en Meuse/Haute-Marne en France. Mais certaines expérimentations

effectuées dans des laboratoires en site granitique fournissent également un retour d'expérience intéressant, comme l'expérimentation de scellement (nommée TSX) au Canada [67] ou les expérimentations de remblaiement à Äspö en Suède [103]. Dans le cadre des expérimentations menées dans ces laboratoires, des recherches ont aussi été effectuées sur les moyens de mesures, par exemple en comparant plusieurs technologies redondantes, ou en explorant des approches innovantes.

10.3.5.2 Enseignements du retour d'expérience pour la conception d'un système d'auscultation

Les « règles de l'art », qui se sont développées sur la base d'un retour d'expérience de l'observation et de la surveillance de nombreux ouvrages de génie civil, permettent d'établir un ensemble de bonnes pratiques.

La première règle est la redondance de moyens. Cette redondance permet de vérifier la cohérence de mesures acquises par différents moyens. Elle permet aussi de limiter la perte d'informations lorsqu'un capteur est défaillant et ne peut être remplacé. Dans des ouvrages inaccessibles, la redondance de mesures peut être réalisée, soit en utilisant des technologies différentes, soit en dédoublant le même type de capteur. Dans des ouvrages accessibles, il est possible de combiner une inspection visuelle avec un suivi géométrique effectué par des moyens topographiques avec les mesures obtenues à l'aide de capteurs enfouis dans l'ouvrage. Ces méthodes sont complétées au besoin par des prises et analyses d'échantillons solides ou fluides. Cette pratique est mise en œuvre notamment pour les barrages hydrauliques, les tunnels ferroviaires et les enceintes de confinement de centrale nucléaire. Un autre moyen pour contribuer à la redondance consiste à compléter une distribution de mesures ponctuelles par une mesure globale intégrant la grandeur mesurée sur une plus grande échelle (par exemple, déformations locales de dilatation thermique et allongement global).

Le choix des moyens d'auscultation et la qualité de leur mise en œuvre sont aussi des éléments très importants pour aboutir à un système d'auscultation pertinent, fiable sur une longue durée et exploitable [32]. Les capteurs doivent être choisis spécifiquement en fonction de l'amplitude de la grandeur à mesurer et de la précision attendue. En outre, une mauvaise mise en œuvre d'un capteur peut conduire soit à sa perte, soit à des mesures fortement perturbées.

La répartition des moyens d'auscultation doit être choisie avec soin. Des modélisations numériques préliminaires peuvent contribuer à déterminer les positions les plus pertinentes pour les capteurs autour des ouvrages. À titre d'exemple, la position des capteurs placés autour du puits au niveau de l'expérimentation de suivi de son creusement (expérimentation REP) a été déterminée en particulier à l'aide de modélisations du comportement mécanique et hydromécanique de la roche.

Les moyens d'auscultation doivent permettre une dissociation des phénomènes pour corriger les mesures brutes. Ainsi, pour le suivi des déformations (principalement dans le béton ou la roche) par des extensomètres enfouis dans l'ouvrage, une analyse correcte des mesures exige le suivi simultané de la température. En effet, l'amplitude des déformations (réversibles) de dilatation thermique des matériaux, surtout s'ils sont peu déformables, peut-être du même ordre de grandeur que l'amplitude des déformations irréversibles que l'on cherche à suivre. La mesure simultanée de la température permet ainsi de corriger ces effets thermomécaniques¹⁴³. De même, dans le cas particulier du béton, la mise en œuvre d'éprouvettes instrumentées libres de se déformer permet d'évaluer l'effet initial de retrait, lors de la prise du béton, sur les déformations mesurées par le capteur mis en place avant la prise du béton. Il est également intéressant de compléter ces mesures, à terme, par l'analyse d'éprouvettes carottées, pour suivre l'évolution des propriétés chimiques et mécaniques intrinsèques du béton.

Enfin, l'étude des moyens d'auscultation doit être réalisée dès la phase de conception des ouvrages à observer. De ce point de vue, le groupe de travail « Auscultation » de l'Association Française des Travaux en Souterrain [96] « estime que l'auscultation doit être considérée comme un sous projet à part entière qui accompagne l'ouvrage depuis sa conception jusqu'à sa réalisation ». Cette approche

¹⁴³ Cette correction ne doit pas être confondue avec la correction de l'effet de la température sur le capteur, qui est généralement intégrée dans le logiciel d'acquisition de mesures.

permet, entre autres, de minimiser d'éventuelles difficultés de mise en œuvre lors de la construction et contribue largement à rendre les capteurs « discrets ».

10.3.5.3 Recensement des moyens d'auscultation adaptés au stockage

Le retour d'expérience en matière d'auscultation fournit des informations intéressantes sur la nature des capteurs qui seraient les plus adaptés à l'observation du stockage ainsi que sur la technologie de transmission des mesures. Ces capteurs sont choisis pour mesurer les grandeurs mentionnées à la section 10.3.2. (déformations et contraintes dans les revêtements, température, hygrométrie, concentration en gaz et caractérisation de l'EDZ) sur de longues durées d'exploitation et, pour certains d'entre eux, dans des conditions d'environnement agressives.

● Déformations, déplacements et contraintes mécaniques

Les déformations locales dans le béton (à l'échelle centimétrique) sont souvent mesurées par des extensomètres à corde vibrante, dont la mise en œuvre typique est illustrée par la Figure 10.3.1. Ils sont mis en œuvre par exemple dans de nombreux tunnels, des barrages et dans toutes les enceintes de confinement de centrales nucléaires depuis plusieurs décennies. Ils ont fait preuve d'une grande fiabilité sur une durée de vie de plus de 50 ans et rien n'indique qu'ils s'approcheraient de la fin de leur bon fonctionnement. À titre d'exemple, de tels capteurs sont toujours opérationnels au sein du barrage voûte du Castillon (France), depuis sa construction peu avant 1950.

Le taux de fonctionnement de ces capteurs est très bon même après plusieurs décennies. Sur les mille capteurs qui ont été enfouis dans le barrage Daniel Johnson au Canada, 90 % d'entre eux sont encore en service après 40 ans de fonctionnement. Le même taux de 90 % est obtenu pour les 630 capteurs enfouis dans les revêtements et voussoirs du tunnel sous la Manche depuis une vingtaine d'années.



Figure 10.3.1 Illustration d'un extensomètre à corde vibrante, rattaché à une armature et intégré dans l'ouvrage en béton

Dans la roche ou les matériaux de remblayage, les déformations sont réparties sur des distances plus grandes. Elles sont donc mesurées par des extensomètres à base longue, comportant plusieurs capteurs et placés en forage ou

dans du remblai. De tels extensomètres, dont la base de mesure peut atteindre une centaine de mètres environ, fournissent en quelques points répartis au sein du forage le déplacement relatif (dans une direction donnée) de ces points les uns par rapport aux autres et par rapport au fond du forage. De nombreux tunnels et barrages sont équipés d'extensomètres de forage ou de remblai, depuis plus d'une trentaine d'années. Par ailleurs, des extensomètres à corde vibrante et des extensomètres à base longue de différents types ont été mis en œuvre dans un démonstrateur de faisabilité du futur EPR à l'échelle 1/2, où ils ont supporté des cycles de pression de 0,4 MPa et des cycles thermiques de -5 °C à environ 100 °C. Malgré ces conditions difficiles, le taux de défaillance des capteurs est resté limité et les mesures ainsi acquises sont parfaitement exploitables.

Le déplacement global d'un ouvrage sur trois axes peut être suivi en intégrant des pendules verticaux dans cet ouvrage. La mesure est effectuée sur une table de mesure située à une extrémité du pendule (cf. Figure 10.3.2). Le suivi des enceintes de confinement en béton précontraint de centrales nucléaires met ainsi en œuvre des pendules verticaux, capables de fournir des mesures globales de déformations latérales et verticales, intégrées sur la hauteur du pendule ou par tronçon entre deux tables de mesure. Ce principe est aussi employé pour suivre les déplacements des barrages en béton (mouvements vers l'aval, vers les rives ou gonflement) et pour le suivi des déplacements des puits (distorsions au niveau de certaines couches plus déformables par exemple).

Les mesures de déplacement ne fournissent en général que des déplacements relatifs par rapport à un point qui est rarement fixe (fond du forage de l'extensomètre, point d'accrochage du pendule). Cet inconvénient peut, dans certains cas, être levé en associant un levé topographique au système d'auscultation par capteurs ou pendules. Cependant, les mesures topographiques sont souvent trop imprécises par rapport aux variations de déplacements mesurées par les capteurs.

Il existe peu de techniques disponibles pour mesurer directement des contraintes en continu dans un ouvrage souterrain. Des cellules de pression totale sont parfois utilisées pour mesurer directement la pression du terrain sur un revêtement de tunnel, mais elles ne sont pas adaptées à une exploitation en stockage, car elles ne sont pas fiables sur la durée et leur mise en œuvre est difficile. Le plus souvent, la pression du terrain est déterminée de manière indirecte, à partir des mesures de déformations dans le terrain et éventuellement dans le revêtement. De même, les contraintes dans le revêtement sont déterminées à partir des déformations locales mesurées dans le revêtement en supposant que le béton du revêtement a un comportement élastique connu.

● Évolution de l'EDZ

L'évolution de l'EDZ est couplée au taux de déformation et à l'état de saturation de la roche. Elle est suivie indirectement, en mesurant les déformations de la roche proche des parois d'ouvrages et en détectant une éventuelle zone désaturée proche des parois. Cette technique a l'avantage de reposer sur des moyens d'auscultation fiables et éprouvés, notamment sur des extensomètres inductifs multicapteurs en forages et sur des cellules de pression interstitielle. Un exemple de noyau inductif (tige cuivrée) et d'un capteur (bague de couplage opaque) est illustré sur la Figure 10.3.3.



Figure 10.3.3 Extensomètre inductif de forage

Il est aussi possible de détecter la présence et une évolution de l'EDZ en mettant en œuvre une écoute acoustique depuis la paroi ou des techniques de mesure microsismiques. Plusieurs options sont disponibles, permettant soit d'écouter directement le son produit lors d'une éventuelle création de fractures dans la zone endommagée, soit d'émettre une onde connue et de corréliser ses propriétés de transmission avec l'endommagement de la roche en paroi. Dans tous les cas, l'écoute s'effectue avec des géophones ou accéléromètres. La technique de mesure par propagation d'ondes microsismiques a été utilisée dans le laboratoire de Meuse/Haute-Marne et a démontré son efficacité.



Figure 10.3.2 Table de mesure d'un pendule vertical

● Pression interstitielle

La pression de l'eau interstitielle est usuellement mesurée, dans les fondations, dans les remblais et dans les noyaux argileux de tous les grands barrages français, par des cellules de pression interstitielle à corde vibrante (Figure 10.3.4). Il n'existe pas de données officielles sur leur durabilité. Le retour d'expérience en termes de fiabilité et de longévité donne un taux de fonctionnement d'environ 80 % après plusieurs décennies d'exploitation, par exemple sur le barrage réservoir de la Marne depuis 1971 ou, le barrage sur l'oued Mellegue en Tunisie depuis 1954. En outre, ce type d'instrument peut fournir une indication a minima sur l'état de saturation des matériaux.



Figure 10.3.4 Cellule de pression interstitielle à corde vibrante

● Humidité relative

L'humidité relative de l'air est mesurée régulièrement dans de nombreuses installations industrielles où ce paramètre influe sur le processus de fabrication (par exemple dans l'industrie alimentaire) ainsi que dans toutes les stations météorologiques. Cette mesure est effectuée le plus souvent par des hygromètres à condensation ou par des hygromètres capacitifs. Ces derniers reposent sur les propriétés diélectriques du capteur et mesurent la variation de la permittivité en fonction de la quantité d'eau absorbée. Étant donné leur besoin de maintenance et d'étalonnage régulier, leur mise en œuvre est réservée aux zones accessibles.

● Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau peut être suivie localement en mettant en œuvre une sonde TDR (« Time Domain Reflectometry » ou réflectométrie électromagnétique). Elle exploite la différence de permittivité entre la roche et l'eau, et permet ainsi de déduire la teneur en eau de la mesure de permittivité du milieu poreux. Ce type de sonde doit être étalonné spécifiquement pour le matériau (remblais, argile gonflante) ou la roche à suivre. Sa mise en œuvre est réservée aux zones accessibles, pour permettre une maintenance régulière.

La distribution de teneur en eau, par exemple dans le champ proche d'une galerie, peut également être suivie par tomographie électrique, en mettant en œuvre un ensemble d'électrodes en paroi et en forages. Plusieurs expériences effectuées par la Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), notamment dans les laboratoires souterrains de Äspö et du Mont Terri, ont démontré les performances techniques d'un tel système. Ils ont notamment démontré la capacité de suivre l'étendue de la zone désaturée en paroi d'ouvrage.

● Température

La mesure de la température est le plus fiable et le plus éprouvé de tous les types de mesures. La température est suivie sur tous les ouvrages, soit pour contribuer à l'analyse d'autres types de mesures influencés par les variations thermiques (par exemple dans les tunnels autoroutiers en fonction de



Figure 10.3.5 Thermomètre à corde vibrante

la saison et du trafic routier), soit pour vérifier une évolution thermique attendue ou pour surveiller un critère de dimensionnement. Le moyen le plus fiable pour mesurer de façon ponctuelle la température est le capteur à corde vibrante (Figure 10.3.5). Ce type de capteur est particulièrement robuste et

bénéficie d'un très important retour d'expérience sur de longues durées, en particulier en tunnel (tunnel de Chamoise, tunnel sous la Manche).

En outre depuis une dizaine d'années environ, des mesures de température distribuées sur de longs profils sont effectuées à l'aide de fibres optiques [104] (Figure 10.3.6). Compte tenu de l'utilisation plus récente de la fibre optique, il est recommandé actuellement de combiner les deux techniques, en redondance. Les capteurs ponctuels et les capteurs à fibres optiques peuvent être enfouis dans le béton, placés dans un forage ou dans les remblais, ou encore laissés dans l'atmosphère des ouvrages.

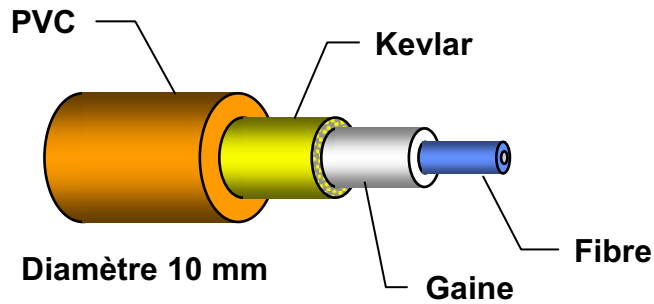


Figure 10.3.6 Fibre optique pour mesure distribuée de température

● Concentration en gaz toxiques, corrosion, contamination

Les capteurs physico-chimiques pour mesurer le pH ou les concentrations en hydrogène ou en oxygène équipent de nombreux sites industriels. Ils ont néanmoins des durées de vie limitées et nécessitent un re-calibrage régulier. Ils ne peuvent donc être utilisés qu'en zones accessibles.

Par exemple, des détecteurs de présence d'hydrogène exploitant une technologie électrochimique ou de semi-conducteur sont disponibles. Ils sont perturbés par l'humidité, la température, l'ambiance radiologique ou encore la longueur des câbles et nécessitent un re-calibrage régulier.

Pour le suivi de la corrosion d'éléments métalliques, les méthodes d'inspection visuelle directe ou à distance par des caméras miniaturisées, puis les prélèvements d'échantillons ou des mesures par ultrasons sont réalisables tant que l'objet ou la zone à observer est accessible ou à une distance accessible par télécommande. Des témoins de corrosion (anodes sacrificielles...) peuvent être employés, soit pour signaler l'absence de corrosion significative, soit pour détecter un taux de corrosion élevé. Ce type d'indicateur est utilisé dans la surveillance de pipelines et d'ouvrages en béton armé en milieu marin.

Dans l'industrie nucléaire, la contamination éventuelle est suivie régulièrement par des systèmes de spectrométrie de masse. Ils analysent des échantillons obtenus par l'aspiration de l'atmosphère à contrôler, à travers un filtre, pour identifier les isotopes et pour quantifier leur activité. Ce principe est par exemple utilisé pour la surveillance des aérosols radioactifs α - β dans l'atmosphère des installations nucléaires. Les restrictions d'utilisation sont semblables à celles des détecteurs d'hydrogène et nécessitent donc un re-calibrage régulier.

● Moyens de transmission et centralisation

L'acquisition et le suivi des données tendent de plus en plus vers une gestion centralisée, en particulier compte tenu du nombre croissant de mesures effectuées. Cette gestion centralisée facilite notamment l'acquisition et l'exploitation des mesures.

Depuis une dizaine d'années environ, les moyens de mesures à signaux électriques traditionnels sont complétés par des technologies de capteurs à fibres optiques. Ces derniers s'intègrent aisément dans un réseau de transmission à base de fibres optiques. Les moyens optiques présentent plusieurs avantages comparés aux câbles électriques. Ils sont insensibles aux perturbations électromagnétiques et les signaux sont transmis sans avoir besoin d'amplification sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Il est également possible d'utiliser une technologie de transmission électromagnétique à basse ou très basse fréquence permettant de s'affranchir de toute liaison physique entre le capteur et le système de réception. Cette technologie de transmission sans fil est utilisée depuis une vingtaine d'années dans l'industrie pétrolière pour le pilotage directionnel des forages dirigés ainsi que pour l'observation des gisements. Un tel système est utilisé sur le laboratoire de Meuse/Haute-Marne pour le suivi des pressions et des températures *in situ* (Figure 10.3.7). Ainsi, des sondes piézométriques installées à 420 m de profondeur transmettent leurs informations sans liaison filaire vers la surface. La durée de vie de ces équipements dépend de celle des batteries embarquées avec les capteurs et de la fréquence des mesures. Elle est environ d'une dizaine d'années en utilisation normale [87]. Un des objectifs des développements en cours est d'augmenter cette durée de vie.

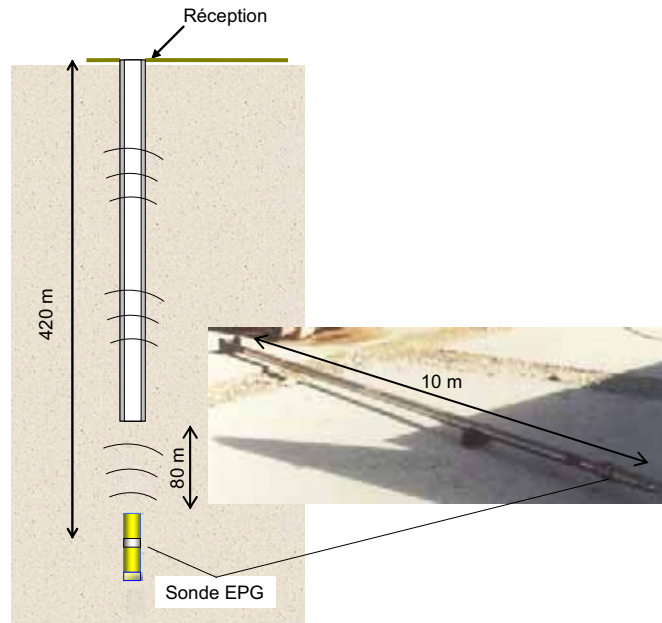


Figure 10.3.7 Transmission sans fil vers la surface au site du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne

Une technique similaire de transmission sans fil de galerie à galerie a été testée avec succès dans le laboratoire souterrain d'Äspö (Suède) (Figure 10.3.8) par l'agence Japonaise RWMC (Radioactive Waste Management Funding and Research Center). Elle vise une durée de vie de plusieurs décennies. Un moyen similaire est aussi actuellement utilisé pour le suivi des tassements de la plateforme de l'aéroport international de Kansai au Japon, situé sur une île artificielle.

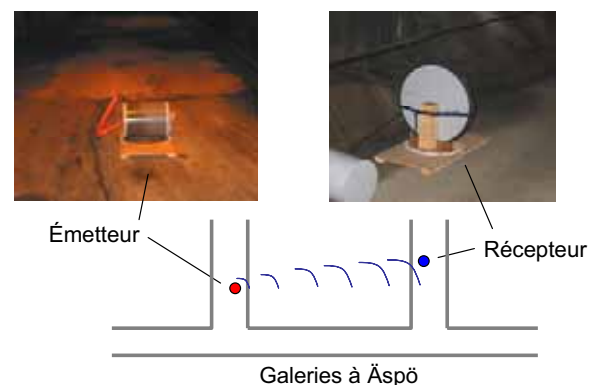


Figure 10.3.8 Dispositif expérimental de transmission sans fil dans le laboratoire souterrain de Äspö

Comme indiqué plus haut, la technologie de la transmission sans fil fait actuellement l'objet d'un programme de recherche et de développement mené en partenariat entre RWMC et l'Andra dans le but d'étudier la faisabilité d'un tel système dans le cas particulier des contraintes imposées par les alvéoles notamment en termes de température, de rayonnement et d'interférences avec les éléments métalliques présents dans les ouvrages.

10.3.5.4 Retour d'expérience sur l'exploitation des mesures

En termes d'exploitation des mesures, une méthode d'analyse statistique initialement développée par EDF [100] s'est généralisée au niveau international pour le suivi des barrages et des centrales nucléaires. Cette méthode s'appuie sur les mesures déjà acquises pour décrire le comportement observé, déterminer l'amplitude des variations réversibles induites par les phénomènes connus (par exemple les effets thermiques) et en déduire la part d'évolution irréversible. Sur la base de l'analyse du passé de l'ouvrage, il est possible lors d'une nouvelle mesure d'identifier rapidement (et automatiquement) si l'ouvrage évolue dans la continuité du passé ou s'il a modifié son comportement.

L'établissement de corrélation entre grandeurs mesurées et l'utilisation de modèles numériques permet d'évaluer l'évolution à plus long terme des ouvrages.

Cette approche est maintenant opérationnelle dans le domaine des barrages et des centrales nucléaires, car elle bénéficie d'un très long retour d'expérience, qui a permis de bien comprendre le comportement de ces ouvrages et donc de mettre au point progressivement la méthode d'analyse.

Dans le domaine des tunnels et plus généralement des autres ouvrages de génie civil, l'analyse des mesures au-delà de la période de construction est relativement récente et la diversité d'utilisation des tunnels conduit le plus souvent à des méthodes d'analyse au cas par cas [32]. Elle s'appuie aussi sur des corrélations entre mesures et sur la confrontation entre les mesures et les prédictions de modèles numériques. Cette confrontation permet d'affiner ces modèles, puis d'améliorer la prédiction de l'évolution future des ouvrages. Cette démarche itérative de modélisation, d'observation, de confrontation et d'amélioration des modèles, peut se poursuivre tout au long de l'exploitation des ouvrages [105].

10.3.6 Logique d'observation et de surveillance

Cette section résume la logique envisagée pour l'observation et la surveillance d'un stockage réversible [87]. Les éléments essentiels de cette logique résident dans la sélection représentative des ouvrages à instrumenter et l'anticipation des besoins d'auscultation tout au long de la vie de ces ouvrages.

10.3.6.1 Sélection représentative d'ouvrages instrumentés

Compte tenu de l'homogénéité de la couche hôte et du caractère répétitif des structures du stockage, il est envisagé de sélectionner quelques ouvrages considérés comme représentatifs des différentes catégories (alvéoles de stockage de déchets B et C, éventuellement de combustibles usés ; puits et galeries ; scellements ; remblais). Les ouvrages ainsi sélectionnés feront l'objet d'une observation et d'une surveillance particulière, et ce, tout au long du processus de stockage.

À ce stade des études, le nombre et la répartition des ouvrages observés ne peuvent être donnés qu'à titre indicatif. Ils seront adaptés en fonction des résultats acquis sur les premiers ouvrages instrumentés et des choix de gestion effectués par la suite. Les connaissances seront progressivement capitalisées au fur et à mesure de l'exploitation du stockage et permettront de préciser le nombre d'ouvrages à observer, d'optimiser la répartition des moyens de mesure et éventuellement d'en réduire le nombre.

Ainsi, les alvéoles de stockage destinées à être observées de manière approfondie sont désignées par le terme « alvéoles témoins ». D'autres alvéoles, en plus grand nombre et désignées par le terme « alvéoles courantes », font l'objet d'une instrumentation plus légère, pour confirmer le comportement observé sur les alvéoles témoins et pour transposer les résultats à l'ensemble de la zone de stockage concernée.

Dans la zone de stockage des déchets B, comportant environ une quarantaine d'alvéoles, plusieurs types d'alvéoles différentes peuvent être identifiées en fonction des colis qu'elles contiennent : colis de déchets bitumés, colis faiblement exothermiques et colis avec dégagement de gaz. Une alvéole de chaque type peut être choisie comme alvéole témoin, et éventuellement une deuxième par souci de redondance.

Les zones de stockage des déchets C ou de combustibles usés se caractérisent en revanche par un très grand nombre d'alvéoles identiques. Des alvéoles témoins seront naturellement sélectionnées parmi les premiers modules construits. Leur nombre, qui ne peut être que faible par rapport au nombre total d'alvéoles, peut être fixé de manière statistique, à moins de 10 % des alvéoles du module sélectionné, et à moins de 1 % de l'ensemble des alvéoles nécessaires pour stocker l'inventaire des colis. Au sein d'un « module témoin », la position des alvéoles sera adaptée en fonction des conditions réelles attendues (en particulier en fonction du dégagement thermique réel des colis à stocker). De manière générale, il peut être intéressant de répartir les alvéoles témoins d'une part au centre du module et

d'autre part en bordure du module, pour pouvoir observer les éventuelles différences de comportement correspondantes (Figure 10.3.9).

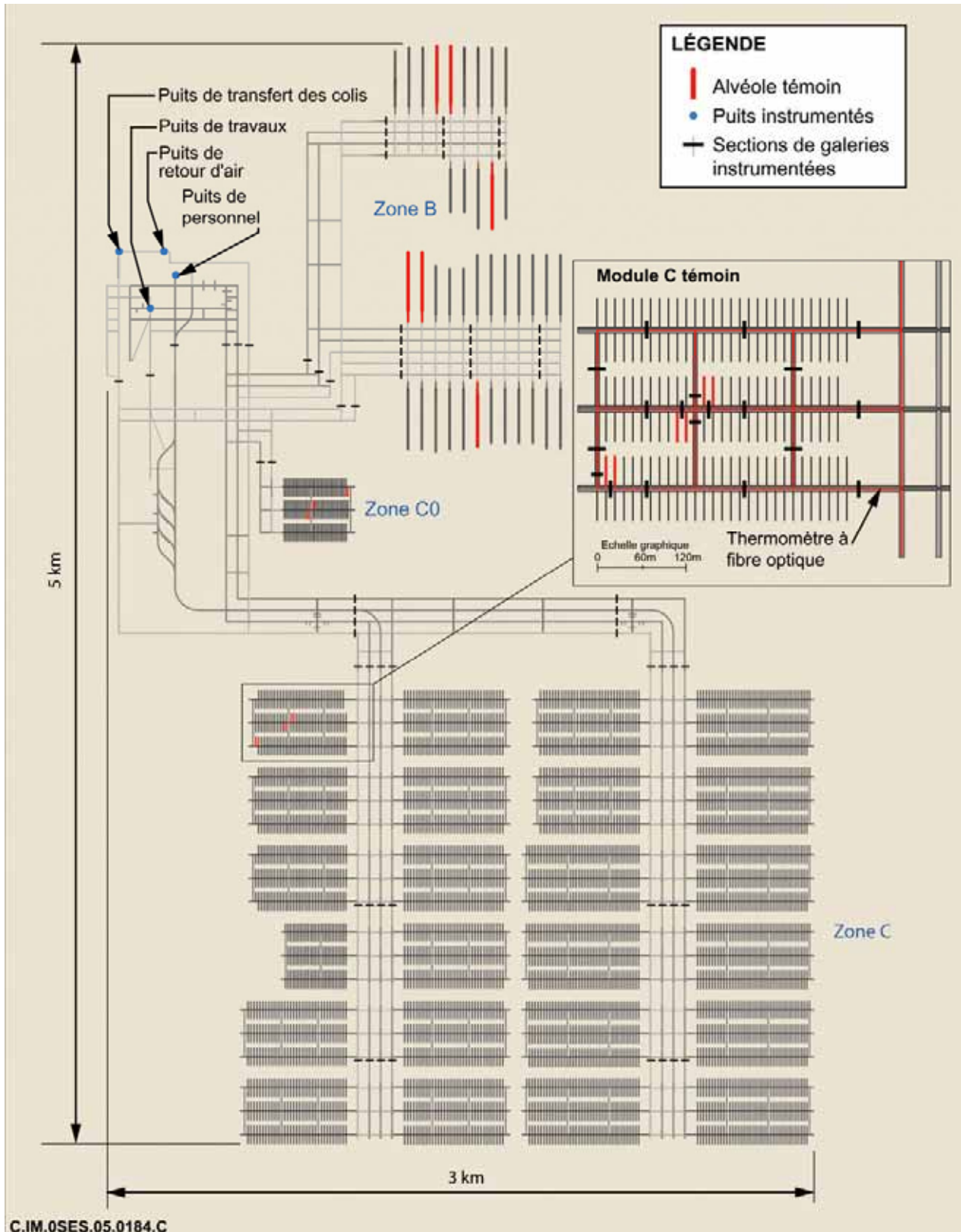


Figure 10.3.9 Exemple de l'auscultation à l'échelle d'un stockage, à un instant du processus de stockage

L'auscultation des ouvrages d'infrastructure nécessite de sélectionner des sections et des tronçons de galeries ou de puits à instrumenter. Ces zones instrumentées sont réparties sur l'ensemble des infrastructures. La distance entre ces zones n'est pas précisée a priori. La densité des zones instrumentées en lien avec la sûreté opérationnelle, et en particulier pour le suivi de la tenue mécanique des ouvrages, s'appuiera sur le retour d'expérience acquis en génie civil et surtout dans le laboratoire souterrain. Afin de limiter le nombre de zones instrumentées, on s'efforcera de combiner les mesures prévues pour l'observation du stockage avec celles dédiées à la surveillance opérationnelle.

Pour les ouvrages de fermeture (remblais et scellements), l'auscultation cherche à répondre à des objectifs de surveillance vis-à-vis de la sûreté à long terme. Cependant, la resaturation complète de ces ouvrages nécessite des durées trop élevées pour pouvoir raisonnablement être suivies intégralement dans le cadre d'un programme d'observation et de surveillance. Le suivi de ces ouvrages est donc limité à leur évolution à court terme après mise en place (tassements et échanges de fluides en paroi). Ce sont donc les premiers scellements d'alvéoles B et de galeries ainsi que des tronçons des premières galeries remblayés qui feront l'objet d'une surveillance approfondie. L'auscultation des ouvrages suivants sera ensuite adaptée en fonction des résultats obtenus sur les premiers ouvrages.

La logique envisagée en matière de répartition des alvéoles témoins et des sections instrumentées de galerie à l'échelle du stockage est illustrée par la Figure 10.3.9. Cette répartition montre qu'un nombre modéré d'ouvrages observés permet un suivi à l'échelle du stockage. Cependant, cette illustration ne reflète pas une vision figée du programme d'observation dans la mesure où le retour d'expérience des premiers ouvrages observés permettra d'ajuster le choix et la répartition des moyens de mesure.

10.3.6.2 Anticipation des évolutions déclenchées par les étapes de gestion

La mise en œuvre des moyens d'auscultation s'effectue dès la construction de l'ouvrage concerné. Ils doivent permettre de suivre les phénomènes qui se produiront au cours des différentes étapes de stockage, et en particulier ceux qui se produiront après la mise en place des colis puis après le scellement des alvéoles. La conception du système d'observation tient compte d'un taux de défaillance attendu des capteurs, en fonction de la durée d'auscultation envisagée. Si l'ouvrage devient inaccessible (par exemple à l'issue du remplissage d'une alvéole ou du remblayage d'une galerie), ces pertes potentielles peuvent être compensées par une redondance adaptée des capteurs. Enfin, lorsque l'utilisation d'une transmission par câbles ou fibres optiques devient défavorable (notamment pour éviter de traverser un scellement), il est envisageable d'utiliser un système de transmission sans fil.

10.3.7 Observation des modules de stockage de déchets B

L'observation des alvéoles de stockage de déchets B est essentiellement focalisée sur les phénomènes qui caractérisent ces ouvrages au cours des différentes étapes du processus de stockage à savoir : l'évolution des contraintes induites sur le revêtement par la formation géologique, l'évolution du niveau de saturation de l'environnement proche de l'ouvrage et la production de gaz par certains déchets. En outre, pour les alvéoles contenant des déchets exothermiques, l'évolution de la température est également un phénomène important.

10.3.7.1 Le dispositif d'observation d'un module témoin

Le dispositif permettant l'observation d'une « alvéole B témoin » est constitué de 6 sections instrumentées fournissant des mesures ponctuelles et de fibres optiques fournissant des mesures distribuées de façon axiale sur la totalité de la longueur de l'alvéole. Ce dispositif est complété par un forage instrumenté en fond d'alvéole ainsi que par le suivi de l'air de ventilation (Figure 10.3.10). L'ensemble de ce dispositif est mis en place au moment de la construction de l'ouvrage.

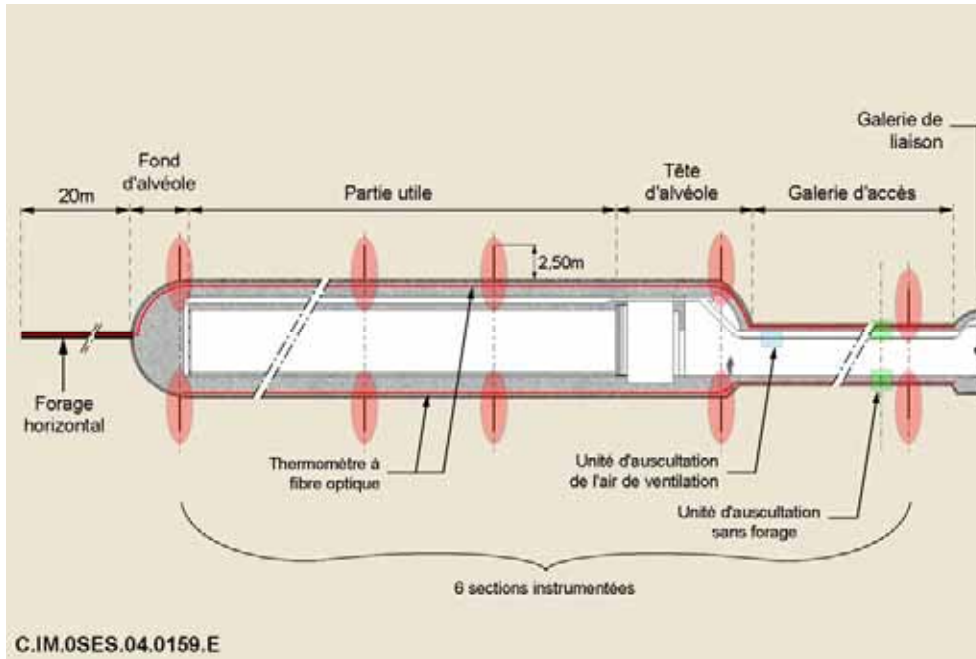


Figure 10.3.10 Dispositif d'observation d'une alvéole B témoin

Les sections instrumentées sont positionnées en fond d'alvéole (une section), en partie courante (2 sections), en tête d'alvéole (une section) et dans la galerie d'accès (2 sections). Chaque section instrumentée fournit un suivi « bidimensionnel » de l'ouvrage. La vision tridimensionnelle est obtenue par le regroupement des informations acquises dans toutes les sections instrumentées et par les mesures distribuées fournies par les fibres optiques le long de l'ouvrage.

● Les sections instrumentées

Une section instrumentée est constituée de plusieurs unités d'auscultation (voir Figure 10.3.11). Cette répartition permet de suivre plus particulièrement les déformations en voûte et en radier et de vérifier le faible impact du béton de remplissage sur le comportement en compression de l'anneau résistant. La redondance des zones d'auscultation sur les parements droit et gauche permet de quantifier d'éventuelles dissymétries de comportement de l'ouvrage. De plus, en cas d'évolution symétrique, ce dispositif offre une redondance des mesures.

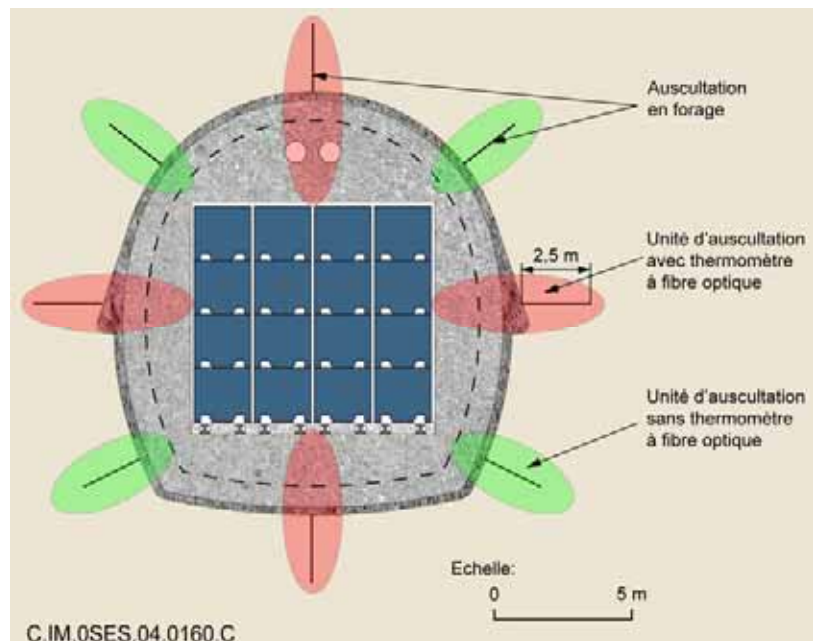


Figure 10.3.11 Constitution d'une section instrumentée d'un module B témoin

Dans la galerie d'accès, les sections instrumentées sont particulièrement intéressantes pour connaître l'état de la roche et du revêtement avant, pendant et après la mise en place des saignées et du noyau d'argile.

Chaque unité d'auscultation concerne le suivi (i) de l'atmosphère de l'alvéole, (ii) du revêtement de l'alvéole (iii) de la formation géologique dans l'environnement proche de l'ouvrage. L'ensemble des capteurs regroupés dans une telle unité est illustré dans la Figure 10.3.12.

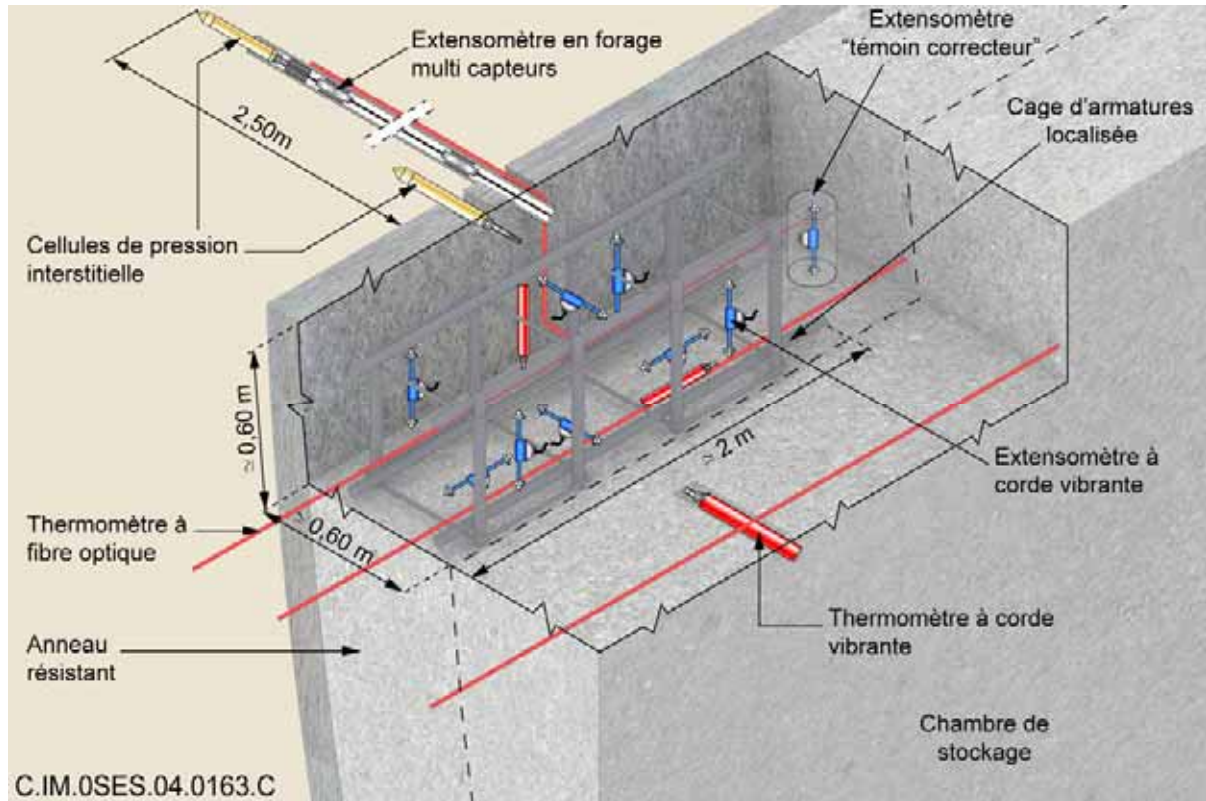


Figure 10.3.12 Unité d'auscultation dans une alvéole B témoin

Le suivi de l'atmosphère de l'alvéole est limité à une mesure de température en paroi. À cet effet, un capteur à corde vibrante est noyé dans le béton de remplissage, la partie sensible dépassant dans la chambre de stockage. D'autres données caractéristiques de cette atmosphère, à savoir l'hygrométrie et la concentration éventuelle d'hydrogène, sont recueillies dans l'air de ventilation sortant de l'alvéole. En effet, ces paramètres sont difficiles à mesurer in situ sans avoir accès aux capteurs pour effectuer leur maintenance (voir ci-dessous).

Le suivi du revêtement peut être réalisé par un groupe d'extensomètres à corde vibrante, un extensomètre témoin correcteur et deux capteurs de température à corde vibrante. L'ensemble de ces capteurs est mis en place dans l'anneau de compression du revêtement, à l'aide d'une cage d'armatures (de longueur d'ordre métrique), avant le bétonnage. Ils sont ainsi solidaires du béton après sa prise.

Les extensomètres à corde vibrante mesurent les déformations locales dans les trois directions. Les déformations sont mesurées à mi-épaisseur du revêtement, sauf les déformations tangentielles qui sont mesurées usuellement à l'intrados et à l'extrados. De plus, une redondance de toutes les mesures est prévue. L'extensomètre témoin correcteur, également pris dans le béton, est désolidarisé de l'anneau résistant de façon à ne pas subir les contraintes dues à la poussée du terrain. Il permet donc de mesurer précisément les déformations induites par le retrait du béton lors de sa prise et par les variations de température ou de taux de saturation, à proximité immédiate des autres extensomètres. Il est alors possible d'en déduire les déformations dans les trois directions spécifiques à la poussée du terrain.

Chaque extensomètre fournit aussi une mesure de température, pour que le système d'acquisition puisse corriger la mesure brute des déformations « parasites » du capteur dues aux variations de température. Ces mesures sont complétées par deux sondes de température placées à l'intrados et à

l'extrados du revêtement pour déterminer ainsi le gradient thermique radial et en déduire le flux de chaleur émis vers la roche par les colis ou l'air ventilé.

Le suivi de la roche en champ proche peut être réalisé par un ensemble de capteurs constitué (i) d'un extensomètre multicapteur à noyau inductif mis en place dans un forage court réalisé perpendiculairement à l'axe de l'alvéole, (ii) une fibre optique permettant la mesure distribuée de température dans ce même forage (iii) deux capteurs de pression interstitielle.

L'extensomètre multicapteur fournit les déplacements différés de la roche dans la direction radiale. Ces mesures peuvent être corrélées avec les déformations dans le revêtement induites par la poussée du terrain. La longueur du forage est limitée à une longueur équivalente à celle des boulons courts, pour respecter les fonctions de sûreté à long terme. De ce fait, le point d'ancrage de l'extensomètre en fond de forage, n'est pas fixe et les déplacements mesurés sont des déplacements relatifs de la roche sur des longueurs d'ordre métrique.

Le suivi de la température dans la roche complète les mesures de distribution radiale du champ de température dans l'atmosphère et dans le revêtement. L'évolution du gradient thermique peut éventuellement permettre de confirmer le suivi de la désaturation progressive de la roche en paroi, avec laquelle il est corrélé.

Le suivi de la pression interstitielle permet de suivre le drainage de la roche en paroi et de détecter son passage à un état désaturé. Les capteurs sont placés à proximité de la paroi de l'alvéole et au bout du forage, afin de détecter le moment où la roche commence à se désaturer, puis la progression radiale du front de désaturation dans la zone microfissurée.

● **Les fibres optiques à mesures distribuées**

Des fibres optiques enfouies sur toute la longueur de l'ouvrage dans le béton (une à l'intrados du revêtement, une à l'extrados et une dans le béton de remplissage) peuvent permettre d'effectuer un suivi du champ thermique dans sa dimension axiale. Une des fibres peut être prolongée jusqu'au bout du forage en fond d'alvéole afin de compléter le suivi du champ thermique dans le champ proche.

● **Le suivi de l'air de ventilation**

Le suivi du flux d'air en entrée et en sortie de l'alvéole permet de compléter le bilan thermique de l'alvéole, déterminer l'hygrométrie de son atmosphère et détecter ultérieurement une éventuelle présence d'hydrogène ou d'éléments toxiques. Le débit d'air peut être facilement mesuré dans la gaine de ventilation de retour d'air, alors que les températures de l'air sont mesurées, en entrée et en sortie, avec des capteurs à corde vibrante. Des capteurs d'humidité (psychromètre), qui nécessitent une maintenance régulière, peuvent être installés dans la galerie et dans la gaine de retour d'air pour mesurer l'hygrométrie de l'air entrant et sortant. Enfin, des dispositifs permettant un échantillonnage de l'air en entrée et en sortie d'alvéole permettent de réaliser des mesures complémentaires.

10.3.7.2 L'évolution du dispositif d'observation d'un module B après la mise en place des colis

Le dispositif d'observation décrit précédemment est mis en place dès la construction pour suivre l'évolution de l'ouvrage le plus longtemps possible pendant l'exploitation du stockage et principalement pendant et après la mise en place des colis. La robustesse et la redondance des moyens d'observation envisagés apportent une garantie raisonnable que ce dispositif continuera à fournir des données fiables pendant une durée suffisante pour apprécier le comportement de l'alvéole au cours de l'étape « après mise en place des colis ».

Les contraintes environnementales imposées sur les capteurs ont un niveau modéré. La température attendue au niveau des capteurs ne devrait pas dépasser 50 °C tant que l'alvéole est ventilée. L'influence de l'irradiation sur les instruments est faible car la plupart d'entre eux sont protégés par le béton du revêtement. Aucune perte de matériel attribuable aux conditions d'environnement n'est donc attendue pendant cette étape, à l'exception éventuellement des thermomètres placés en paroi de la chambre de stockage.

Sur la base du retour d'expérience, il est probable qu'environ 90 % des capteurs de mesure ponctuelle resteront opérationnels au moins une cinquantaine d'années. Or, les conditions environnementales des capteurs évoluent peu au-delà de quelques dizaines d'années et les pertes de ce type de capteurs se produisent surtout lors des premières années de leur mise en service. Un taux de perte de moins de 50 % environ semble donc possible à l'échelle séculaire et peut être toléré sans perturber de façon préjudiciable l'observation globale de l'ouvrage. Les fibres optiques ne disposent certes que d'un retour d'expérience plus limité (de l'ordre d'une dizaine d'années), mais elles ne présentent a priori pas de caractéristiques susceptibles de les fragiliser à plus long terme.

Le dispositif d'observation tel qu'il a été mis en place à la construction du module peut donc être exploité lors de cette étape pendant plusieurs décennies pour les dispositifs qui ne peuvent être maintenus (en particulier ceux dans les alvéoles). Les dispositifs pouvant être maintenus peuvent être exploités sans limitation de durée.

10.3.7.3 L'évolution du dispositif d'observation d'un module B après le scellement de l'alvéole

L'évolution des conditions environnementales engendrée par la construction du scellement de l'alvéole n'a pas de conséquence significative sur la fiabilité des capteurs qui fonctionnent déjà sans possibilité de maintenance depuis la mise en place des colis.

En revanche, la transmission des mesures effectuées dans l'alvéole est rendue plus complexe par la présence du noyau d'argile. En effet, le souci de préserver les performances hydrauliques du scellement nécessite une modification du dispositif de transmission. Il est important de pouvoir prolonger l'observation au-delà de ce jalon pour connaître les conditions attendues dans l'alvéole et la galerie d'accès lors d'un éventuel retour en arrière, pour démanteler le scellement ou récupérer les colis.

Pendant une période transitoire, la transmission des mesures à travers le scellement est néanmoins envisageable, tant que cela ne nuit pas à long terme aux performances mécaniques et hydrauliques du scellement. Plusieurs options sont à l'étude à cet effet. Elles sont fondées sur une transmission sans fil ou sur une transmission provisoire par câbles suivie par une remise en état du scellement.

Comme il n'est pas possible d'observer la resaturation, ni le gonflement du scellement – qui nécessite plusieurs milliers d'années – l'auscultation du scellement cherchera à suivre l'évolution de la roche en champ proche, l'évolution éventuelle de l'état initial (non saturé) du scellement et éventuellement un début de resaturation à proximité des saignées.

L'auscultation du scellement peut être réalisée au droit des deux sections instrumentées de la galerie d'accès, proches de l'interface entre le noyau d'argile et le massif d'appui en béton (Figure 10.3.13). Le suivi du revêtement se poursuit lors de cette étape. Il est complété par plusieurs unités d'auscultation intégrées dans le noyau d'argile et le massif d'appui en béton.

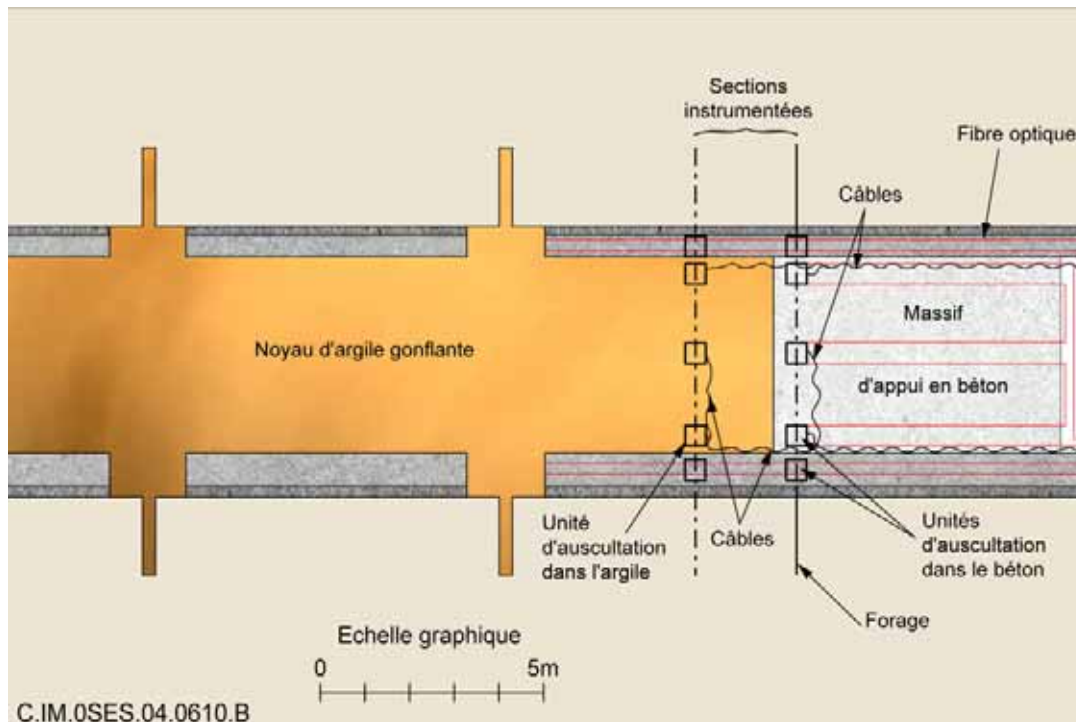


Figure 10.3.13 Dispositifs d'auscultation de la partie aval d'un scellement

Le suivi du massif d'appui en béton met en œuvre des moyens d'auscultation semblables à ceux décrits pour le revêtement (Figure 10.3.12). Le suivi du noyau d'argile gonflante s'appuie sur le suivi des noyaux de barrages. Il met en œuvre des regroupements de moyens d'auscultation constitués de plusieurs extensomètres à fibre optique, d'un thermomètre à corde vibrante, d'une sonde d'humidité et d'une cellule de pression interstitielle.

10.3.7.4 L'évolution du dispositif d'observation des modules B après la fermeture des galeries

La fermeture des galeries de liaison internes à la zone B impose un abandon des moyens filaires de transmission depuis l'alvéole. S'il était décidé de poursuivre une partie des mesures dans les alvéoles témoins, le recours à une transmission sans fil serait adapté. Cette transmission sans fil à travers les ouvrages de scellement pourrait être relayée par des moyens filaires dans les galeries de liaison remblayées.

La durée de vie d'une transmission sans fil est limitée par la fréquence des mesures, la fréquence de transmission des signaux, par le nombre de capteurs rattachés au dispositif et par la capacité des batteries du système. En diminuant la périodicité et le nombre de mesures, il est concevable de porter cette durée à plusieurs dizaines d'années. À titre d'exemple, le programme de recherche de RWMC vise une cinquantaine d'années environ.

10.3.8 Observation des alvéoles de stockage C

L'observation des alvéoles de stockage de déchets C est essentiellement focalisée sur les phénomènes qui caractérisent ces ouvrages au cours des différentes étapes du processus de stockage à savoir : l'évolution du champ thermique dans et autour de l'alvéole, l'évolution des contraintes mécaniques induites sur le chemisage par la formation géologique et l'évolution de l'atmosphère de l'alvéole dont dépend la corrosion des composantes métalliques.

Différentes options d'instrumentation sont proposées pour une alvéole C témoin ainsi que pour le bouchon argileux qui scelle l'alvéole. Ces options sont aussi adaptées le cas échéant à des alvéoles

CU3, dont la conception de référence est similaire à celle des alvéoles C0. Au stade actuel des études, il est ainsi retenu de ne placer aucun capteur à l'intérieur de la partie utile de l'alvéole.

10.3.8.1 Le dispositif d'observation d'une alvéole témoin C

Les alvéoles C se distinguent des alvéoles B, des galeries et des puits par le fait qu'elles ne sont pas accessibles pendant leur construction à cause de leur faible diamètre. De plus, la mise en place rapide du chemisage en acier empêche la mise en œuvre de moyens d'auscultation dans la roche en paroi d'alvéole.

L'instrumentation envisagée pour une alvéole C témoin est constituée de plusieurs sections instrumentées fournissant des mesures ponctuelles, de fibres optiques fournissant un profil de température sur la totalité de la longueur de l'alvéole, d'un système de mesure de l'atmosphère de l'alvéole rattaché à son bouchon métallique, et de forages instrumentés réalisés à partir de la galerie d'accès parallèlement à l'axe de l'alvéole (cf. Figure 10.3.14) et, le cas échéant, à partir de la galerie de recoupe perpendiculairement à l'axe de l'alvéole. La combinaison de ces dispositifs offre ainsi une flexibilité et une redondance des moyens d'auscultation.

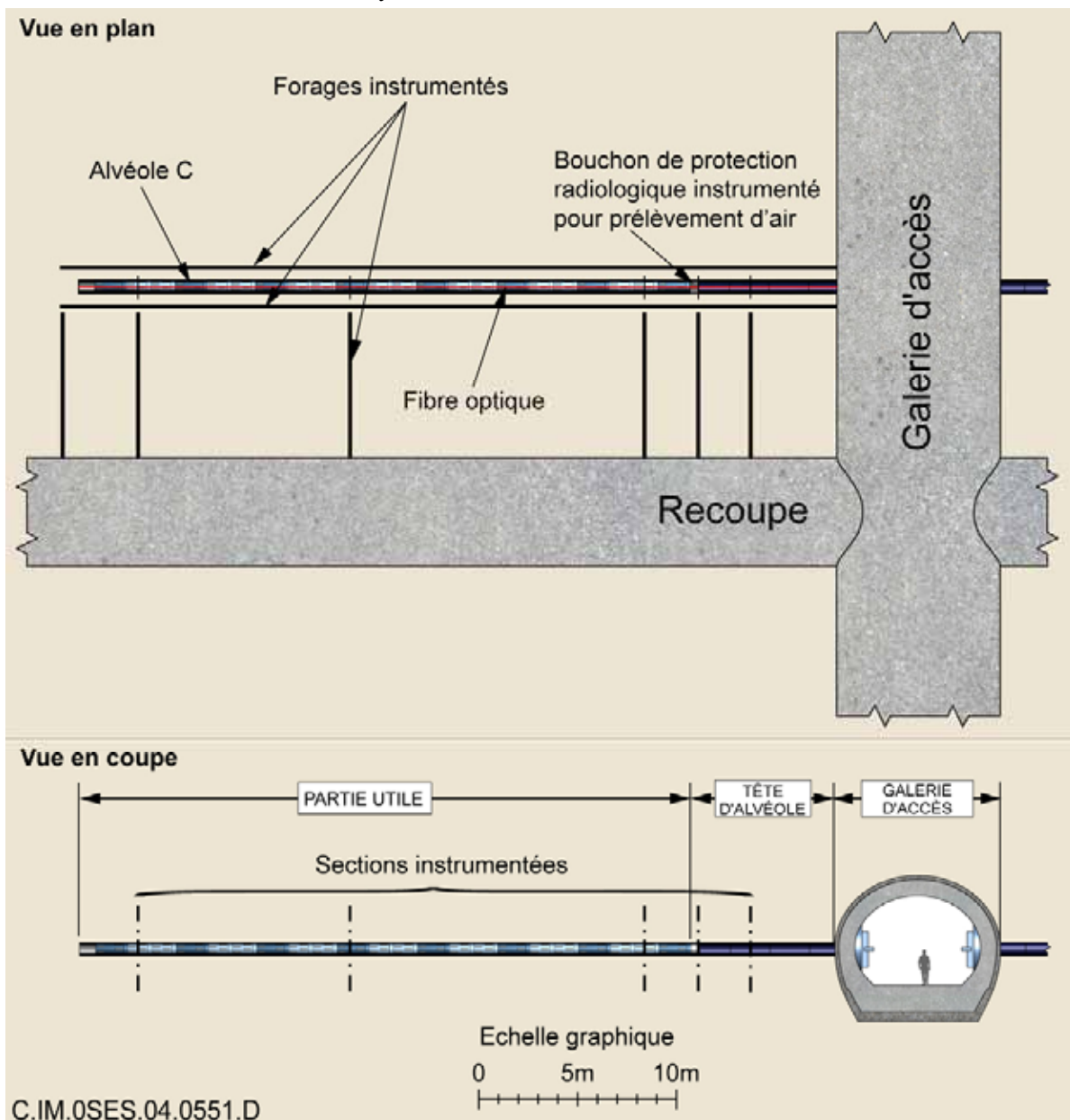


Figure 10.3.14 Moyens d'auscultation envisageables pour une alvéole C témoin

● Les sections instrumentées et les fibres optiques

Les sections instrumentées sont positionnées dans la partie courante de l'alvéole (trois sections), au droit du futur bouchon métallique (une section) et en tête d'alvéole au droit du futur bouchon d'argile (une section). Chaque section regroupe des capteurs permettant le suivi du chemisage et de la roche à proximité de l'alvéole.

Les capteurs et les câbles de transmission sont fixés sur la face externe du chemisage. Trois groupes de capteurs sont ainsi répartis dans une section instrumentée, comme schématisé sur la Figure 10.3.15. Chaque groupe est constitué de deux extensomètres et d'un capteur de température à corde vibrante, pour suivre localement la température et les déformations axiales et tangentielles du chemisage.

En outre, ces capteurs sont complétés par une fibre optique fournissant un profil de température continu sur toute la longueur de l'alvéole. Ces mesures permettent aussi d'évaluer les contraintes thermomécaniques subies par le chemisage ainsi que la température à l'intérieur de l'alvéole.

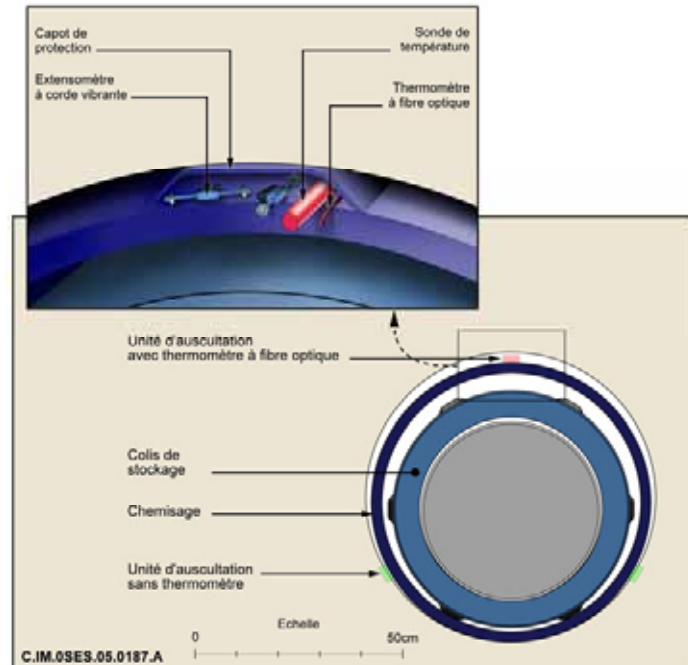


Figure 10.3.15 Exemple illustrant l'auscultation en surface de chemisage d'alvéole C

Le chemisage étant mis en place par poussage au fur et à mesure de l'excavation de l'alvéole, les capteurs et les moyens filaires sont fixés sur chaque tronçon de chemisage, avant qu'il ne soit introduit dans l'alvéole. Pour les protéger lors du poussage du tube, ces moyens d'auscultation sont recouverts d'un capot de protection soudé sur le chemisage, comme cela se pratique couramment pour l'instrumentation des fondations d'ouvrages équipés de pieux métalliques. Ce capot permet également, tant que la poussée du terrain reste faible, d'isoler les capteurs de la roche pour qu'ils ne mesurent que les déformations du chemisage, et non une combinaison de déformations du chemisage et de la roche qui nécessiterait une interprétation plus complexe.

● Le suivi de l'atmosphère de l'alvéole

Le suivi de l'atmosphère de l'alvéole est effectué par un capteur de température à corde vibrante et un psychromètre fixés sur la face interne du bouchon métallique. La résistance des capteurs aux débits de dose n'étant pas acquise à ce stade des études, il pourrait être nécessaire de déporter ces mesures sur la face externe du bouchon métallique. Ces mesures sont complétées par une analyse en laboratoire d'échantillons de l'atmosphère prélevés en partie utile d'alvéole, soit par piquage à travers le bouchon métallique, soit en laissant en attente un tube capillaire dans le jeu résiduel entre le bouchon et le chemisage. Cette analyse porte notamment sur l'humidité relative et le taux d'oxygène dans l'alvéole pour en déduire un éventuel taux de corrosion. Une approche similaire peut être mise en œuvre dans le chemisage en tête d'alvéole, à partir de la galerie d'accès.

● Les forages instrumentés

Une option complémentaire à l'instrumentation d'une alvéole témoin consiste à enfouir des capteurs en forages parallèles ou latéraux à l'alvéole, comme illustré dans la Figure 10.3.16.

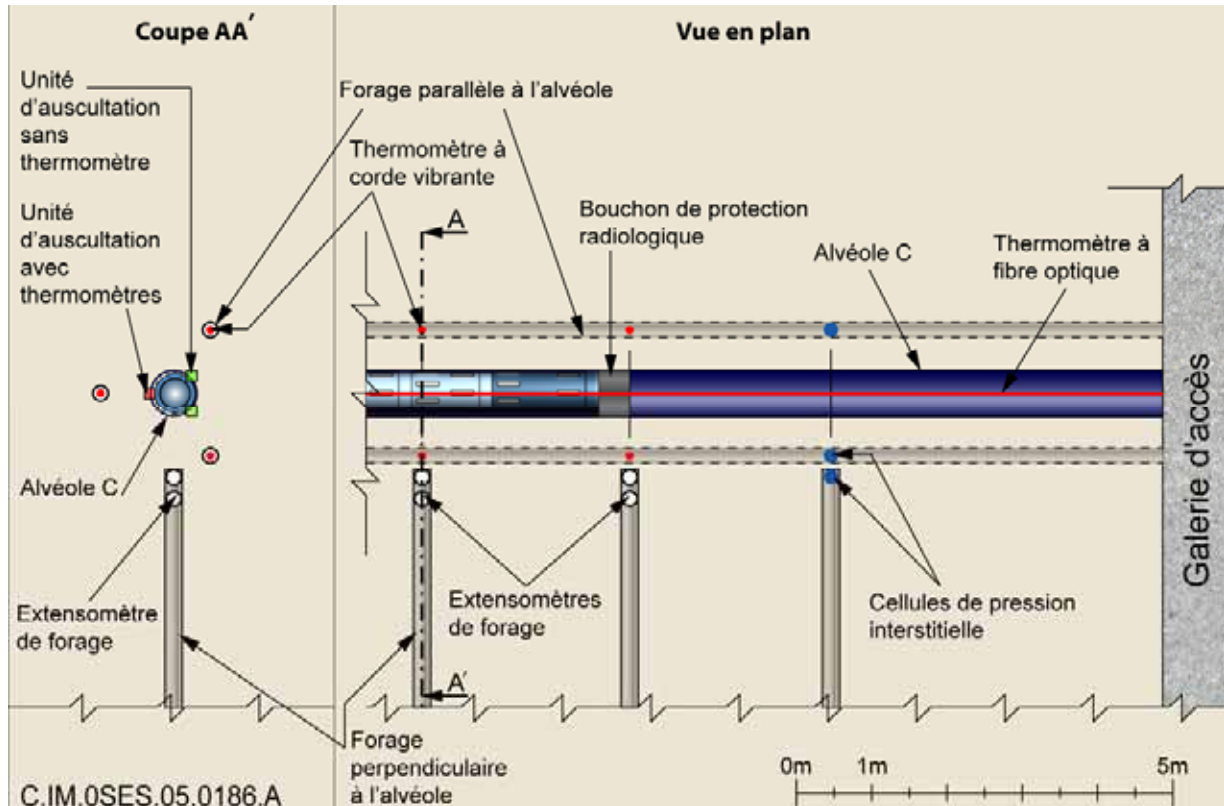


Figure 10.3.16 Auscultation d'une alvéole C sur le chemisage et en forages

Un tel dispositif permet le suivi de la roche à proximité de l'alvéole. Les forages parallèles à chaque alvéole témoin sont répartis comme les unités d'auscultation du chemisage. Ils sont effectués depuis la galerie d'accès. Les forages latéraux sont répartis comme les sections instrumentées, avec un forage supplémentaire situé au-delà du fond d'alvéole. Ils sont effectués depuis la galerie de recoupe.

Plusieurs extensomètres, thermomètres et cellules de pression interstitielle peuvent être intégrés dans ces forages. Ils complètent les mesures de déformation et de température effectuées sur le chemisage. Notamment, ils permettent de déterminer le champ thermique en paroi et à proximité de l'alvéole ainsi que le champ de contraintes dans la roche et dans le chemisage. De plus, le suivi d'une réduction de pression interstitielle à proximité de la tête d'alvéole permet de caler les modèles pour prédire une éventuelle désaturation de la roche au droit du chemisage provisoire.

L'instrumentation en forages présente plusieurs avantages par rapport à l'instrumentation du chemisage. D'une part, le champ proche de l'alvéole témoin peut être ausculté, sans être contraint par la mise en place du bouchon d'alvéole. D'autre part, les conditions d'environnement dans la roche, et particulièrement de débit de dose provenant de l'alvéole, sont peu contraignantes pour la fiabilité ou la durée de vie des moyens d'auscultation.

10.3.8.2 L'évolution du dispositif d'observation d'une alvéole témoin C après la mise en place des colis

Les évolutions mécaniques et hydrauliques et une éventuelle corrosion, initiées pendant la construction de l'alvéole, se poursuivent après la mise en place des colis. De plus, cette mise en place déclenche un réchauffement de l'ouvrage et du champ proche.

Les mesures de déformations effectuées sur le chemisage indiquent les zones mises en compression, en réponse aux charges dues à la combinaison de la poussée du terrain et de la dilation thermique du chemisage. Le suivi des températures permet d'en assurer une interprétation correcte.

Par ailleurs, le suivi des températures sur le chemisage permet de vérifier le respect du critère thermique ($T < 90\text{ °C}$ au contact de l'argilite).

Les moyens d'auscultation mis en œuvre à l'extrados du chemisage et en tête d'alvéole subissent des températures relativement élevées. De plus, ils sont soumis à un débit de dose pouvant contribuer à la dégradation des circuits électroniques. Ce débit de dose est de d'environ 2 Sv/h en surface latérale d'un colis de stockage C2 (enveloppe pour les autres familles de colis C) [107]. Les capteurs ont tendance à intégrer le débit de dose reçu, conduisant à une perte progressive de leur fiabilité. Il sera donc nécessaire de quantifier sur la durée la fiabilité de ces capteurs soumis au rayonnement.

En revanche, les moyens d'auscultation mis en œuvre dans les forages ne sont pas soumis à des contraintes fortes après la mise en place des colis. Les températures restent relativement modérées pendant une dizaine d'années environ et les débits de dose sortant de l'alvéole sont absorbés par la roche. Le retour d'expérience indique qu'environ 90 % des capteurs resteront opérationnels sur une durée de plusieurs décennies. Ils offrent donc une redondance vis-à-vis des pertes attendues de capteurs solidarisés aux composantes de l'alvéole.

De façon analogue aux alvéoles témoins B, le dispositif d'observation tel qu'il a été mis en place à la construction pour une alvéole témoin C peut donc en principe être exploité sans maintenance pendant plusieurs décennies lors de cette étape. On notera néanmoins le risque d'une perte, après une durée non déterminée, des capteurs solidarisés sur le chemisage, tandis que les capteurs solidaires du bouchon métallique peuvent être changés au besoin.

10.3.8.3 L'évolution du dispositif d'observation d'une alvéole témoin C après le scellement de l'alvéole

La mise en place du bouchon de fermeture ne modifie pas sensiblement les conditions d'environnement dans l'alvéole et n'a pas non plus d'implications sur l'exploitation des moyens d'auscultation en forages.

En revanche, le bouchon modifie les conditions de transmission des mesures des capteurs solidaires de l'alvéole. D'une part, à moins qu'un dispositif adapté ait été prévu lors de la mise en œuvre, la transmission filaire sur la face extérieure du chemisage est coupée au droit du bouchon métallique, dès le retrait du chemisage provisoire. D'autre part, la transmission des mesures depuis la tête d'alvéole (rattachées au bouchon métallique) doit être adaptée à la présence du bouchon d'alvéole.

Il est par exemple possible de doter l'alvéole témoin, dès sa construction, d'une transmission filaire redirigée par un forage latéral au droit du bouchon métallique. Elle ne serait pas contrainte par le retrait du chemisage provisoire, ni par la mise en place du bouchon de l'alvéole. Cette option permet en principe de prolonger l'auscultation du chemisage et de l'atmosphère de l'alvéole jusqu'à l'étape suivante, à savoir la fermeture de l'unité d'exploitation. Avant de procéder à cette fermeture, il est néanmoins nécessaire de couper les moyens filaires et de sceller le forage latéral, afin de rétablir des propriétés hydrauliques compatibles avec la sûreté à long terme.

Comme dans le cas des alvéoles B, il est aussi possible, pendant une phase transitoire pouvant aller jusqu'à quelques décennies, de mettre en œuvre un système de transmission sans fil. Un projet de recherche commun RWMC/Andra se focalise notamment sur la transmission depuis la partie utile d'une alvéole, à travers un bouchon en argile gonflante appuyé sur un bouchon en béton, vers la galerie. Dans une première étape, le dispositif de transmission pourrait être intégré dans le bouchon métallique, comme illustré par la Figure 10.3.17.

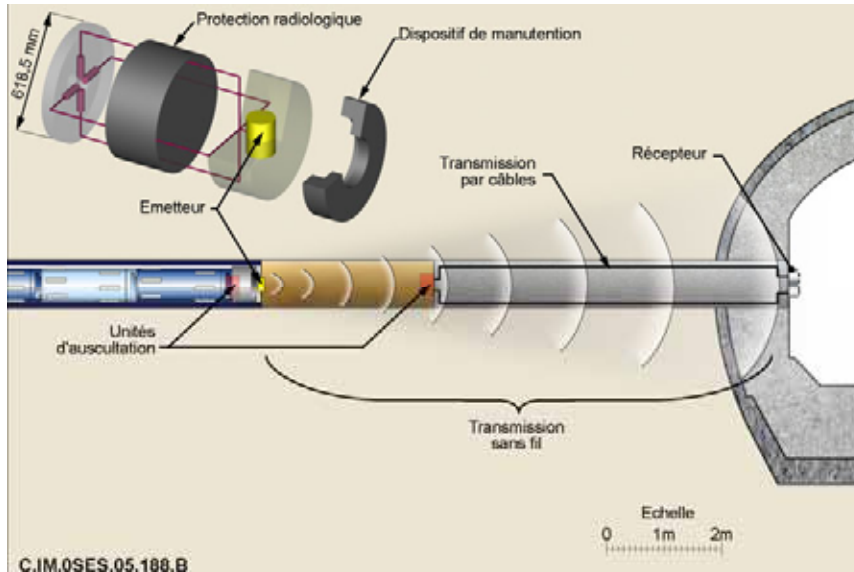


Figure 10.3.17 Dispositif à l'étude d'une transmission sans fil à travers le bouchon d'alvéole C

La transmission de données depuis l'alvéole pourrait être complétée par le suivi du bouchon en argile gonflante. Celui-ci pourrait être effectué en mettant en œuvre un groupe de capteurs, semblable à celui décrit pour le suivi du noyau d'argile d'un scellement d'alvéole B (cf. 10.3.7.3). Afin de ne pas nuire aux performances hydrauliques à long terme du bouchon d'alvéole, ces moyens d'auscultation se situeraient dans une section instrumentée à proximité du massif d'appui en béton. Ils permettraient de suivre la resaturation et la déformation localisée du bouchon dues conjointement au tassement, à la déformation de la roche et au gonflement de l'argile. Ils apporteraient ainsi des informations utiles lors d'un éventuel retour à l'étape précédente, et permettraient de confirmer l'évolution du bouchon au regard des performances hydrauliques attendues à long terme.

En résumé, le suivi de l'évolution du champ proche en forages n'est pas affecté par cette étape. La durée de vie et la fiabilité des capteurs embarqués sur le chemisage ou dans l'alvéole ne sont pas davantage dégradées suite à la mise en place du bouchon d'alvéole. Des options de transmission filaire ou sans fil sont envisageables, permettant de poursuivre l'acquisition de certaines mesures après fermeture de l'alvéole.

10.3.8.4 L'évolution du dispositif d'observation des alvéoles C après le remblayage des galeries

Le remblayage des galeries d'accès n'impose pas de contraintes supplémentaires sur la fiabilité ou la durée de vie des capteurs. L'unique possibilité de transmettre les signaux depuis les alvéoles est d'avoir recours à une transmission sans fil vers les galeries. Comme dans le cas des modules B, les revêtements en béton des galeries ainsi que les remblais tolèrent une présence de moyens filaires. Ils pourraient donc assurer la transmission depuis l'entrée d'une alvéole jusqu'à la galerie de liaison accessible.

De plus, l'évolution des alvéoles peut être déterminée indirectement, par le suivi du champ proche de l'unité d'exploitation. En effet, les mesures en sections instrumentées des galeries d'accès et les mesures de température par fibre optique distribuées sur la longueur de toutes les galeries peuvent être poursuivies sans interruption, à minima jusqu'à l'étape suivante de fermeture des galeries de liaison.

10.3.9 Observation des alvéoles de stockage de combustibles usés

Cette section présente les moyens d'observation envisageables dans les alvéoles témoins de combustibles usés, le cas échéant. Ces moyens sont similaires à ceux présentés pour les alvéoles C. Les alvéoles de combustibles usés se distinguent des alvéoles de déchets C par la présence de deux composants supplémentaires : la barrière ouvragée et le revêtement métallique de l'alvéole. Leur accessibilité pendant la phase de construction permet une instrumentation du champ proche à travers le revêtement perforé. Enfin, elles offrent l'option d'installer des capteurs dans les anneaux de barrière ouvragée préfabriqués avant leur mise en place.

La répartition des sections instrumentées est comparable à celle décrite pour les alvéoles C. Une section instrumentée d'alvéole de combustibles usés témoin (cf. Figure 10.3.18) est constituée de trois unités d'auscultation, regroupant les suivis du chemisage, de la barrière ouvragée, du revêtement et de la roche.

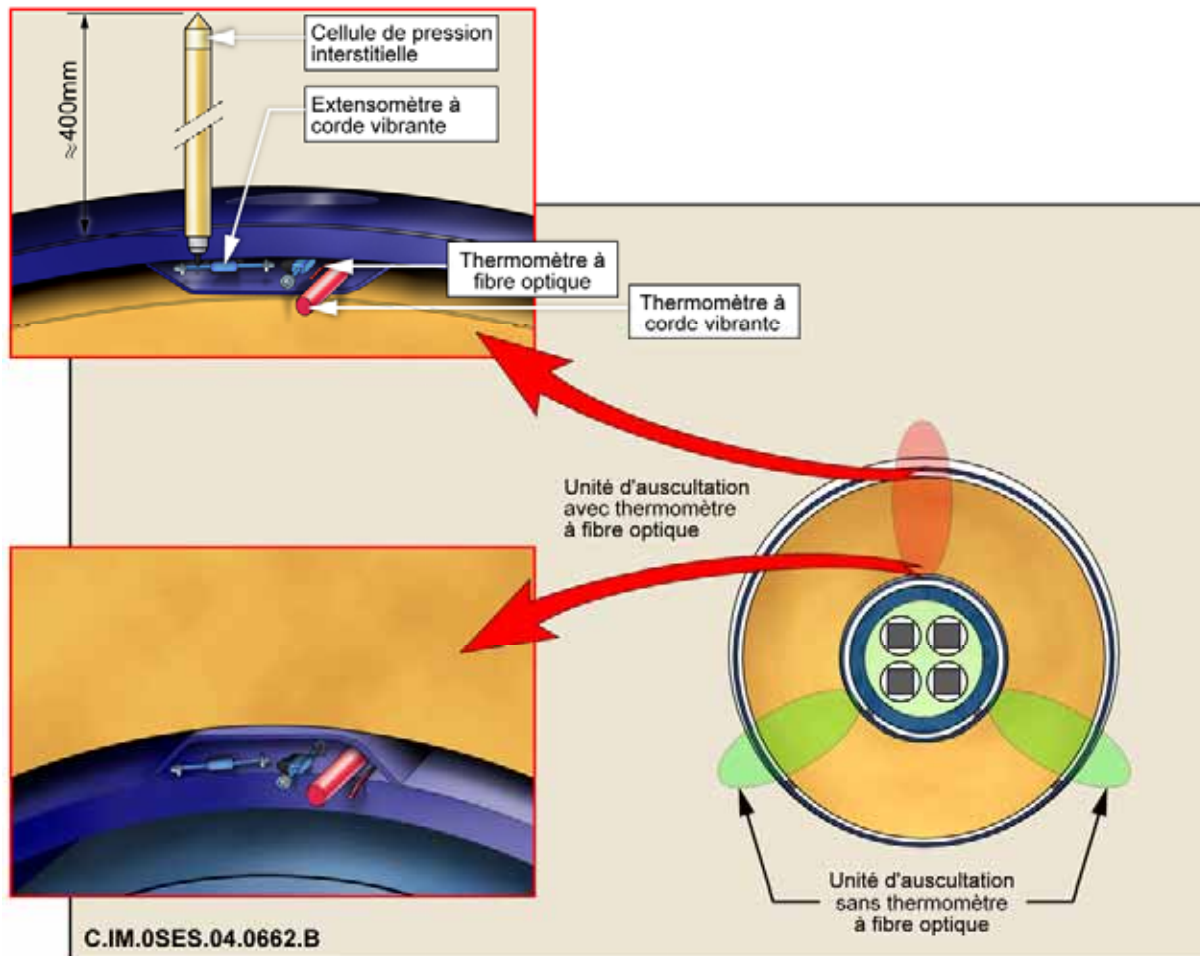


Figure 10.3.18 Section instrumentée d'une alvéole de combustibles usés

Les capteurs mis en œuvre à l'extrados du chemisage et à l'intrados du revêtement sont identiques à ceux décrits dans la section 10.3.8.1 (cf. Figure 10.3.15). Les unités d'auscultation dans la barrière ouvragée en argile gonflante sont identiques à celles proposées pour le noyau d'argile des scellements d'alvéoles B ou des bouchons d'alvéoles C. De plus, une cellule de pression interstitielle est enfouie en forage radial dans la roche hôte.

Ainsi, les moyens d'auscultation permettent de suivre les évolutions thermiques et mécaniques de l'ouvrage et les évolutions hydrauliques du champ proche. Leur combinaison permet d'identifier d'éventuels effets thermomécaniques.

La mise en place des colis pourrait réduire la capacité d'ausculter l'alvéole, puisque l'évolution des conditions d'environnement thermiques et radiologiques pourrait progressivement nuire à la fiabilité des capteurs sur le chemisage. Ces conditions sont moins contraignantes à l'extérieur de la barrière ouvragée, celle-ci atténuant le débit de dose et imposant un gradient thermique radial. Ainsi, la durée de vie des moyens d'auscultation pourra atteindre plusieurs décennies à l'extérieur de la barrière ouvragée.

Le scellement de l'alvéole conduit à une resaturation progressive de l'argile gonflante au droit du bouchon d'alvéole et impose les mêmes contraintes de transmission que celles introduites supra pour les alvéoles B et C. En plus des options de transmission par forages ou par la mise en œuvre d'un dispositif de transmission sans fil, le concept d'une alvéole de combustibles usés offre la possibilité d'acheminer les câbles en paroi du revêtement métallique.

Au fur et à mesure de la fermeture des galeries, l'évolution du dispositif d'auscultation, qui porte surtout sur les moyens de transmission des mesures, est identique à celle présentée pour les alvéoles C (§ 10.3.8.4).

10.3.10 Le dispositif d'observation d'alvéoles courantes

Les répartitions des moyens d'auscultation proposés dans les sections ci-dessus sont adaptées au suivi d'une sélection d'alvéoles témoin. Le suivi des alvéoles courantes s'appuie sur un nombre réduit de ces moyens. On retient qu'une alvéole B courante contient les fibres optiques et une section instrumentée dans la partie utile de l'alvéole. Une alvéole (C ou CU) courante contient la fibre optique et une section instrumentée au droit du bouchon métallique.

10.3.11 Observation des galeries

L'auscultation des galeries est focalisée sur les phénomènes principaux qui caractérisent ces ouvrages, notamment le déconfinement initial de la roche hôte, la formation d'une zone endommagée, une désaturation progressive du champ proche, le fluage de la roche et la remise en pression du revêtement.

10.3.11.1 Le dispositif d'observation des galeries

Les possibilités de mise en œuvre de moyens d'auscultation sont comparables à celles décrites pour les alvéoles B (cf. section 10.3.7.1). Elles se fondent sur des sections instrumentées. Une telle section est illustrée par la Figure 10.3.19. Seule la profondeur des forages, permettant d'intégrer un nombre plus important d'extensomètres, la différence d'une section équivalente d'alvéole B (cf. Figure 10.3.11).

Les capteurs répartis en huit unités d'auscultation permettent de suivre la tenue mécanique et la stabilité dimensionnelle de l'ouvrage, les conditions hygrométriques dans la galerie, les évolutions mécaniques et hydrauliques du champ proche,

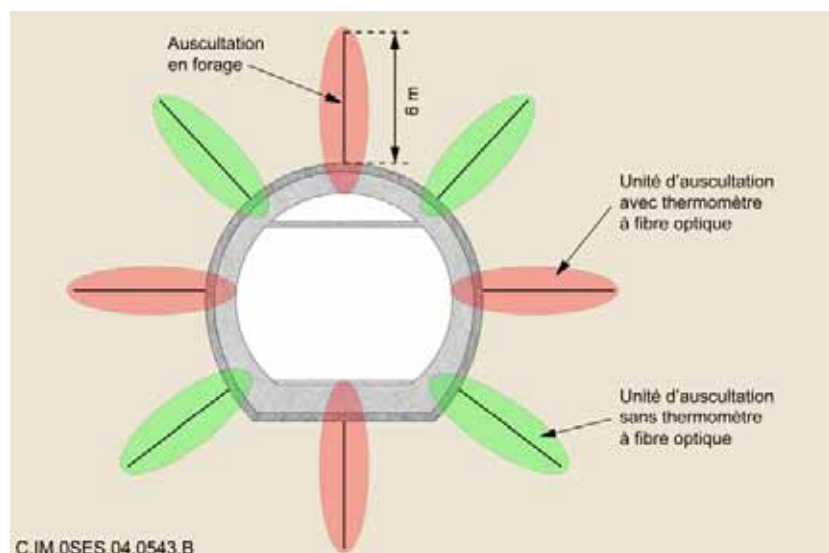


Figure 10.3.19 Illustration des possibilités de répartition des moyens d'auscultation dans une section de galerie

l'évolution du champ thermique, et éventuellement les altérations chimiques subies pendant la durée d'exploitation.

Ces sections instrumentées (cf. §10.3.6.1) sont réparties le long des galeries. De plus, ces dispositifs peuvent être complétés par une inspection visuelle d'ensemble des ouvrages (ou par moyens optiques) et par des mesures distribuées sur des fibres optiques intégrées dans le revêtement.

On rappelle que les galeries de liaison offrent aussi des possibilités d'observation du champ proche, soit d'une alvéole, soit d'un module, sans être contraint par les étapes de fermeture de ces derniers. Selon le choix des capteurs installés dans des forages effectués depuis ces galeries, cela permettrait de suivre les températures, les pressions interstitielles ou les déformations à proximité de l'ouvrage.

Le suivi des galeries et plus particulièrement de leur champ proche fournit des indications sur l'interaction entre alvéoles, qui se fait sentir dès les premières années de stockage pour les colis fortement exothermiques, et, à l'échelle de plusieurs décennies, entre modules. Par exemple, l'homogénéisation progressive du champ thermique et de la pression interstitielle pourrait ainsi être suivie.

10.3.11.2 Évolution du dispositif d'auscultation des galeries après mise en place des colis puis après fermeture des alvéoles

La mise en place des colis en alvéoles et la fermeture des alvéoles provoquent à terme un réchauffement dans les galeries. D'ampleur modérée, voire négligeable lorsque celles-ci sont ventilées, cet échauffement n'a pas de conséquences notables sur la fiabilité ou la durée de vie des capteurs. Leur durée de vie est comparable à celle démontrée par le retour d'expérience dans d'autres ouvrages et varie selon les cas entre plusieurs décennies et environ un siècle.

De plus, tant que les galeries sont accessibles, leur dispositif d'auscultation peut faire l'objet d'une maintenance. La mise en place possible de nouveaux capteurs à la place des capteurs défaillants garantit ainsi une continuité du suivi de ces ouvrages sans limite temporelle avant leur fermeture.

10.3.11.3 Évolution du dispositif d'auscultation des galeries après leur fermeture

L'auscultation des galeries après leur fermeture permet, entre autres, de connaître l'état du revêtement, et ainsi les conditions lors d'un éventuel retour en arrière. On suivra aussi les éventuels tassements du remblai et du scellement, comme illustré pour le scellement d'une alvéole B (cf. §10.3.7.3).

La fermeture d'un tronçon de galerie provoque une resaturation très lente et, selon la position, un réchauffement modéré plus ou moins lent. Dans tous les cas, les évolutions attendues pendant la phase exploitation-observation ne sont pas de nature à affecter la durée de vie ou la fiabilité des moyens d'auscultation.

La mise en place d'un scellement de galerie contraint la transmission des signaux de la partie amont (éloignée des puits) d'un stockage. Tant que le scellement reste accessible en aval, les différentes options de transmission décrites pour l'alvéole B scellée sont disponibles. Lorsque le scellement est rendu inaccessible, par remblayage d'une longueur supplémentaire de galerie, la transmission à travers le scellement ne peut plus être filaire. Une poursuite éventuelle de l'auscultation de la partie amont du scellement, et d'une section de scellement lui-même, peut alors reposer sur une transmission sans fil à travers celui-ci (cf. section 10.3.7).

10.3.12 Observation des puits

L'auscultation des puits est focalisée sur les phénomènes principaux qui caractérisent ces ouvrages, semblables à ceux des galeries, tout en tenant compte éventuellement des spécificités propres aux couches géologiques traversées. Chacun des puits est instrumenté.

10.3.12.1 Le dispositif d'observation des puits

Les moyens mis en œuvre dans les puits se répartissent sur huit sections, implantées dans différents horizons du milieu géologique (cf. Figure 10.3.20). Leur distribution verticale est rattachée à la présence de pendules directs intégrés dans une gaine dans le revêtement, afin d'assurer le suivi de la stabilité dimensionnelle globale du puits. Le retour d'expérience de leur mise en œuvre en barrages et enceintes de confinement suggère une hauteur de chaque pendule limitée entre 60 et 80 mètres environ.

Ainsi, toutes les sections (à l'exception de celle en fond du puits) sont espacées de 80 mètres environ. Trois sections sont proposées pour l'instrumentation dans les argilites : une au fond du puits, une à l'horizon du stockage et une autre au toit du Callovo-Oxfordien. Trois sections sont réparties dans les calcaires de l'Oxfordien supérieur et moyen. Une section permet le suivi dans les calcaires du Barrois et une autre celui d'une couche marneuse du Kimméridgien (située par exemple à - 100 m environ).

Chaque section permet le suivi détaillé du revêtement de puits et du champ proche. Quatre unités d'auscultation en direction radiale semblent être suffisantes pour détecter les éventuelles asymétries d'évolution mécanique, comme indiqué dans la Figure 10.3.21. Les moyens d'auscultation mis en œuvre dans chaque unité ressemblent à celles décrites pour les alvéoles B (voir section 10.3.7) et pour les galeries (voir section 10.3.11), exception faite des forages radiaux plus profonds et de la présence d'une table de mesure pour pendule dans une des unités.

Le détail d'une unité d'auscultation, y compris la table de mesure exploitant le pendule vertical rattaché à la section correspondante, est illustré dans la Figure 10.3.22. Elle permet notamment de suivre la tenue mécanique et la stabilité dimensionnelle de l'ouvrage et les évolutions mécaniques et hydrauliques du champ proche. On notera que la table de mesure du pendule permet de mesurer les déplacements relatifs du revêtement dans trois directions, sur une hauteur correspondant à celle du pendule (séparant deux sections instrumentées). La chaîne de pendules sur une génératrice permet de cumuler les déplacements dans les trois directions, et d'en déduire la déformation globale sur la profondeur du puits.

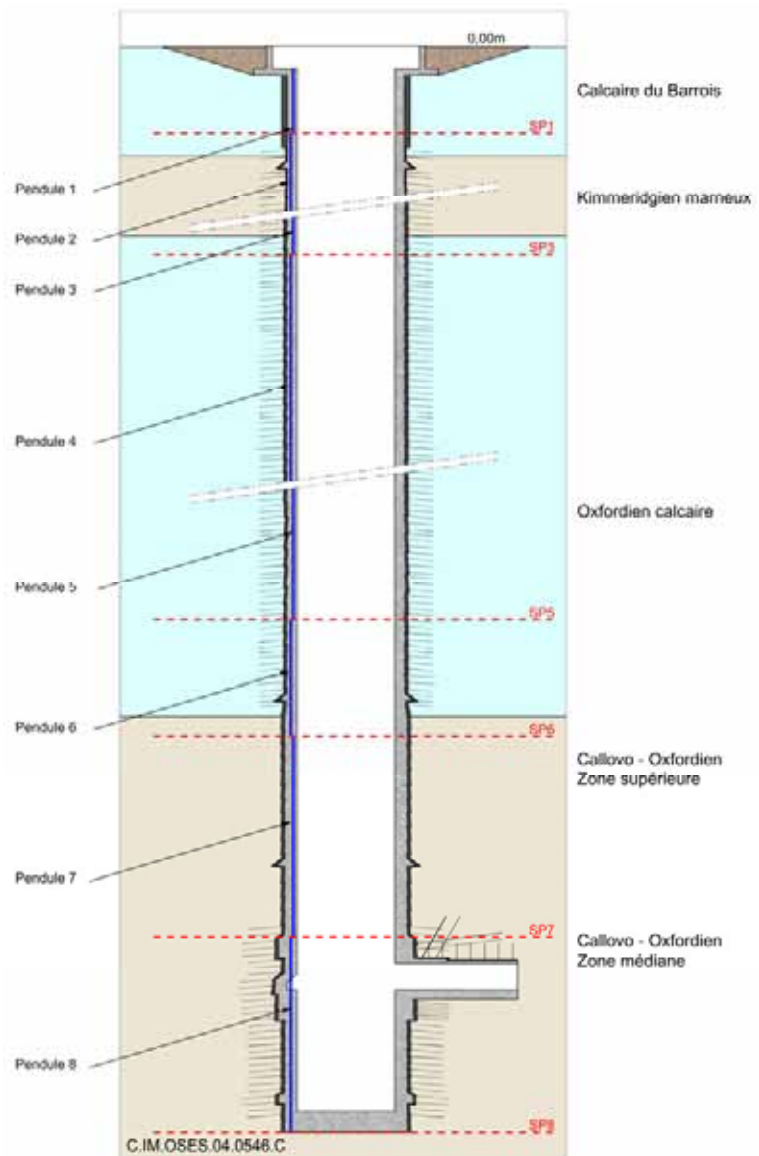


Figure 10.3.20 Répartition des sections instrumentées et des pendules dans un puits

Les moyens d'auscultation intégrés dans l'ouvrage et dans la roche peuvent être complétés par des moyens accessibles en paroi. Ainsi, on pourrait mesurer un débit de suintement sur la paroi interne du revêtement, un débit de flux d'air en entrée ou l'hygrométrie et la température associée à cet air.

Comme pour les galeries de liaison, la durabilité du dispositif d'auscultation avant fermeture du puits est assurée par sa maintenance possible, par remplacement des capteurs défectueux ou ajout de nouveaux capteurs dans les sections où les capteurs enfouis dans le revêtement ne fonctionneraient plus.

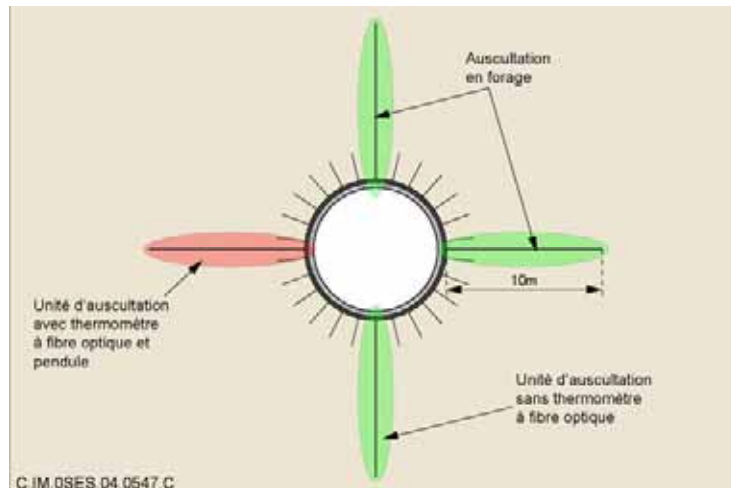


Figure 10.3.21 Section instrumentée d'un puits

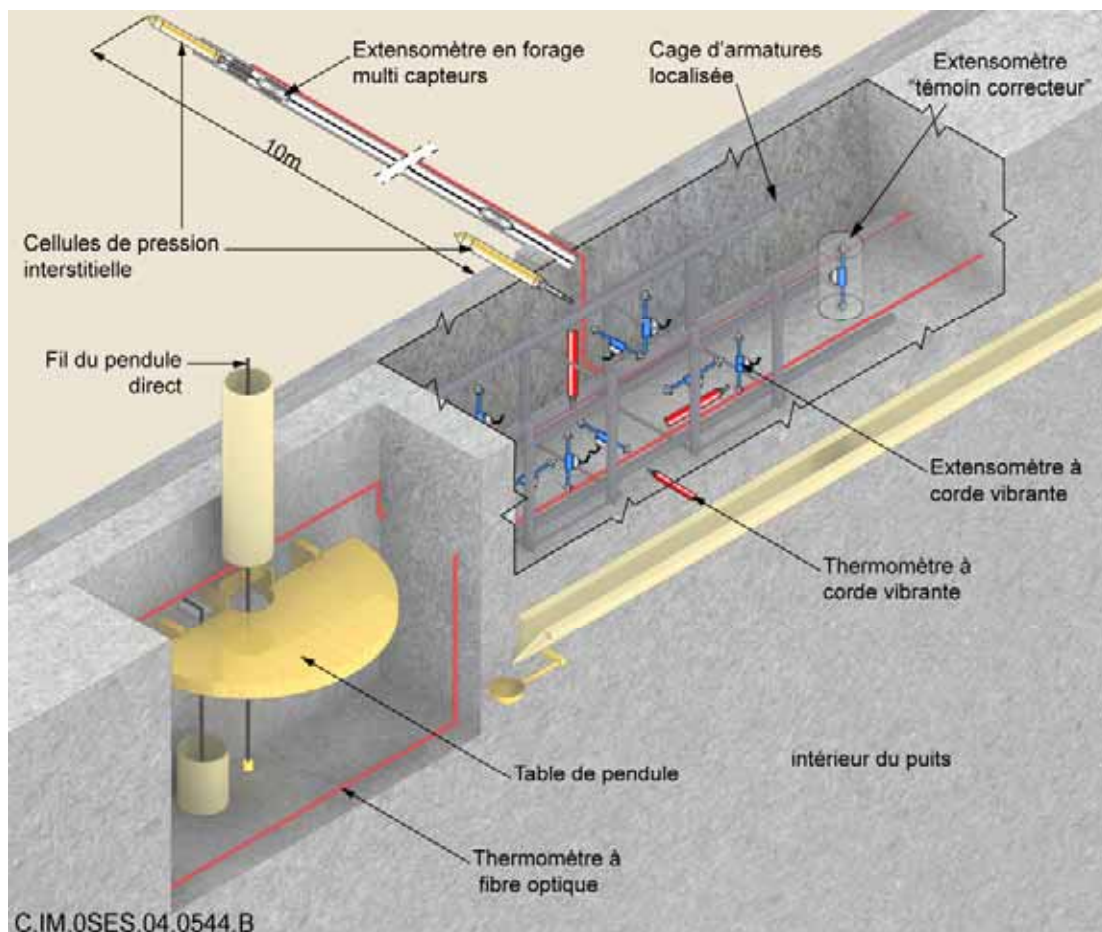


Figure 10.3.22 Moyens mis en œuvre dans une unité d'auscultation en paroi de puits

10.3.12.2 L'évolution du dispositif d'observation du puits après le scellement du puits

La mise en place d'un ouvrage de scellement inclut la dépose du revêtement au droit de ce scellement. Les moyens d'auscultation sont donc aussi déposés. Par ailleurs, cette mise en œuvre n'influe pas sur la durée de vie, ni sur la fiabilité des moyens d'auscultation hors zone de scellement. Les mesures effectuées en aval (côté surface) peuvent donc être poursuivies et transmises vers la surface. Les mesures effectuées en amont (côté profond) peuvent, pendant une période transitoire, être transmises sans fil (voir paragraphes 10.3.5.3 et 10.3.7.4). Si le choix était fait de sceller un puits avant les autres, ces mesures pourraient aussi être transmises à travers un des puits encore accessibles. On notera que dans tous les cas, il est possible de mettre en œuvre des moyens d'auscultation dans deux sections (amont et aval) du scellement, sans affecter de manière significative les performances hydrauliques à long terme de ce dernier.

10.3.13 Conclusion sur l'apport de l'observation à la gestion réversible du stockage

L'observation des ouvrages et notamment des alvéoles renforce la maîtrise de l'évolution phénoménologique du stockage. Elle permet de quantifier les paramètres qui caractérisent chaque étape du processus, fournit une réévaluation de la durée de vie des alvéoles et apporte les éléments requis à l'évaluation des conditions de retrait éventuel des colis de stockage. L'ensemble de ces éléments contribue à fonder sur des données scientifiques et techniques objectives la décision de passage d'une étape du processus de stockage à la suivante.

Dans le cas des alvéoles B, l'observation permet notamment de suivre l'évolution mécanique du revêtement à laquelle est subordonnée la durée de vie des alvéoles. Elle permet également de quantifier les gaz produits par les déchets et de mieux apprécier les conditions de retrait éventuel des colis.

Dans le cas des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés, l'observation permet de suivre l'évolution du champ thermique créé par l'exothermicité des colis et de vérifier son incidence mécanique. Elle permet également de suivre les phénomènes tels que le niveau de resaturation ou la composition de l'atmosphère de l'alvéole qui conditionnent l'évolution du chemisage en termes de corrosion et de stabilité et qui influent donc sur les conditions de retrait éventuel des colis.

Dans le cas des ouvrages d'accès (puits et galeries), l'observation permet de suivre l'évolution mécanique des revêtements et d'identifier un éventuel besoin de maintenance pour prolonger leur durée de vie. Elle permet également de suivre l'évolution mécanique du champ proche derrière le revêtement aux emplacements des futurs scellements et notamment la formation et l'évolution d'une éventuelle zone endommagée.

Le retour d'expérience industriel en matière d'auscultation des grands ouvrages de génie civil montre qu'il est possible d'observer le stockage pendant une durée supérieure à 50 ans grâce à l'utilisation d'un dispositif de mesures constitué de capteurs fiables et éprouvés (par exemple les capteurs à corde vibrante). Au-delà de ces durées, le dispositif d'observation peut être réaménagé notamment lors du passage d'une étape à la suivante par la mise en place de nouveaux capteurs et d'un nouveau mode de transmission des données. À titre d'exemple, la mise en place des scellements d'alvéole pourrait donner lieu à la mise en œuvre d'une technologie de transmission sans fil (testée avec succès dans le laboratoire de Meuse/Haute-Marne) afin de ne pas affecter l'intégrité des massifs d'argile gonflante par le passage de câbles. Ainsi, l'utilisation de capteurs durables et l'adaptation progressive du dispositif d'auscultation permettent d'envisager l'observation des ouvrages tout au long du processus de stockage, sur les échelles de temps considérées pour la réversibilité (durée séculaire à pluriséculaire).

Enfin, le principe consistant à focaliser l'observation de la phénoménologie du stockage sur des ouvrages judicieusement choisis (les ouvrages témoins) pour leur représentativité de l'ensemble de la zone concernée constitue un élément de réalisme opérationnel.

10.4 La capacité de retrait des colis

Le retrait des colis stockés constitue une opération qui pourrait éventuellement être décidée par les générations futures.

L'objectif de cette section est de mettre en exergue les facteurs de conception favorables à une opération de retrait des colis et d'évaluer la faisabilité de cette opération pour les trois étapes clés suivantes :

- après mise en place des colis (alvéole non scellée) ;
- après fermeture de l'alvéole (galerie d'accès accessible) ;
- après fermeture des galeries du module (galeries de liaison accessibles).

L'analyse des conditions et des moyens de retrait est liée à l'évolution phénoménologique présentée dans la section 10.2 et notamment à l'évolution des matériaux dans le temps. Cette analyse est illustrée par quelques exemples de solutions techniques [106].

Le retrait des colis de déchets C et de combustibles usés sera traité conjointement car les deux concepts présentent des similarités en termes de géométrie d'alvéole (tunnels de dimensions modérées à chemisage métallique), de colis (colis métallique de forme cylindrique), d'absence de béton dans l'ouvrage et de système de manutention (robot pousseur ou aéroporteur).

Le retrait des colis B sera traité de manière séparée. En effet, le concept B, contrairement aux précédents, est caractérisé par un ouvrage de grande taille revêtu par du béton, des colis parallélépipédiques en béton et un système de manutention par chariot élévateur.

10.4.1 Le retrait des colis B

10.4.1.1 Les facteurs de conception favorables au retrait des colis

La conception des colis et des alvéoles de stockage B est caractérisée, en particulier, par la stabilité du revêtement qui contribue à la pérennité des jeux fonctionnels dans l'alvéole et par la pérennité des colis de stockage. Ces deux éléments facilitent une éventuelle opération de retrait.

● La stabilité du revêtement de l'alvéole et la pérennité des jeux fonctionnels

Le revêtement de l'alvéole présente deux caractéristiques favorables à une opération de retrait.

Tout d'abord son dimensionnement, le choix des matériaux qui le constituent (béton non armé) et les conditions physico-chimiques dans lesquelles il est placé garantissent la pérennité et la stabilité mécanique de la structure qui abrite les colis pendant une durée au moins séculaire (quelques siècles).

De plus, la forme du revêtement est conçue pour minimiser les jeux résiduels entre ce dernier et les colis de stockage afin d'éviter une opération de comblement qui rendrait ces derniers prisonniers et solidaires de la structure. La chambre de stockage de section interne carrée ménage ainsi des vides résiduels entre les piles de colis et le revêtement d'une épaisseur de l'ordre de 10 cm sur toute la longueur de l'alvéole. Ces jeux, non comblés, restent donc intègres pendant une durée identique à la durée de vie du revêtement. Les colis restent libres à l'intérieur de l'alvéole. Ces conditions sont identiques à celles qui prévalent pendant la phase de mise en stockage. (Figure 10.4.1)

- **La pérennité des colis de stockage**

Le choix du béton pour la constitution des colis de stockage permet d'assurer une durabilité mécanique pluriséculaire d'autant plus que l'environnement est peu agressif. Pour les solutions en béton armé retenues, le phénomène de corrosion des armatures est prévenu par un béton compact non poreux à l'eau de durabilité pluriséculaire, une épaisseur suffisante d'enrobage des armatures et l'emploi d'acier inoxydable pour ces mêmes armatures.

Enfin, la robustesse du colis de stockage limite aussi durablement, à l'échelle de plusieurs siècles, les risques de dissémination d'éléments radioactifs à l'intérieur de l'alvéole.

10.4.1.2 Conditions de retrait à l'étape « Après mise en place des colis »

L'ensemble des équipements du sas de radioprotection (porte d'accostage et plateau tournant) est laissé en place. La ventilation de l'alvéole est maintenue. Lorsque tous les colis ont été mis en place dans l'alvéole (Figure 10.4.2), un mur de protection biologique constitué de blocs en béton peut être mis en place entre les dernières piles de colis et la porte blindée interne de la tête d'alvéole, facilitant l'entretien de cette dernière.

À tout moment, comme dans un entreposage, les colis peuvent donc être retirés. Cependant, cette opération doit être précédée d'une phase préalable de contrôle du caractère opérationnel de la tête d'alvéole.

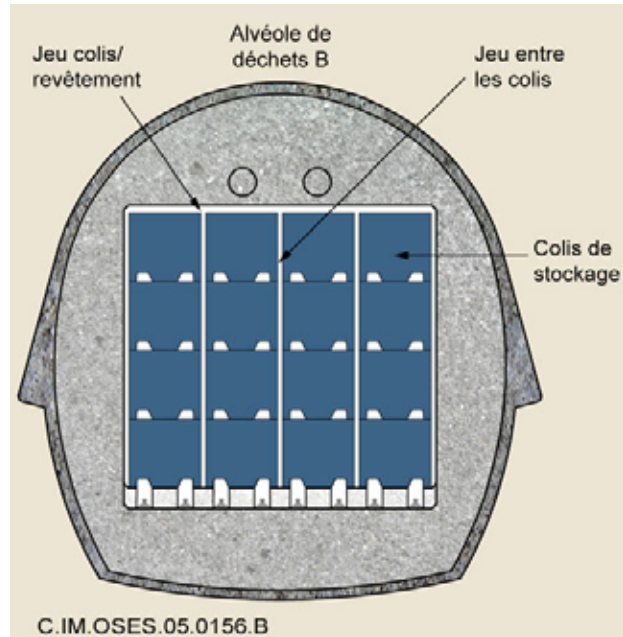


Figure 10.4.1 Les jeux fonctionnels - Coupe d'une alvéole de stockage de colis B

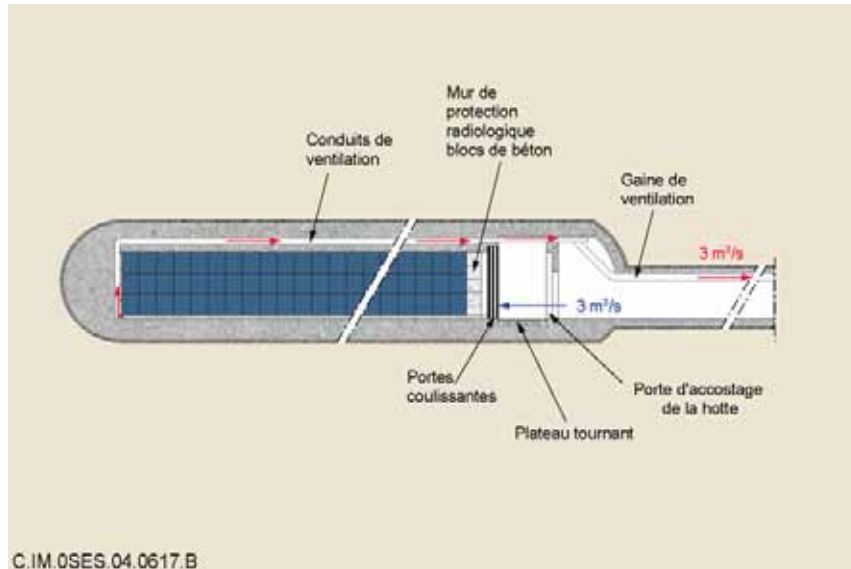


Figure 10.4.2 Alvéole remplie de colis B en fin d'exploitation.

● Le processus préalable de contrôle du caractère opérationnel de la tête d'alvéole

La phase de remise en état, nécessaire en préalable aux opérations de retrait, est limitée à une révision de routine des équipements du sas si le retrait des colis a lieu quelques années après leur mise en place et à un remplacement de ces mêmes équipements devenus éventuellement obsolètes si cette opération devait être conduite après plusieurs décennies.

Le seul équipement mécanique à l'intérieur de l'alvéole est le système de roulement sur rails en acier. La fonctionnalité de cet équipement, pendant cette phase, n'est pas remise en cause par l'évolution phénoménologique de l'alvéole.

● Le processus de retrait des colis

Les équipements et le processus de retrait des colis de l'alvéole, après remise en état d'exploitation du sas de radioprotection, sont strictement identiques à la logique de mise en place des colis. Néanmoins, par mesure de sûreté, un contrôle de l'absence de petits débris éventuels provenant de la dégradation du revêtement sera effectué à l'aide d'une caméra embarquée sur le chariot élévateur. Un engin équipé d'un bras manipulateur pourrait alors être utilisé dans le cas où de tels débris seraient détectés.

La gestion des colis stockés peut ainsi s'effectuer, à cette étape, comme dans un entreposage sur des durées séculaires à pluriséculaires.

10.4.1.3 Conditions de retrait à l'étape « Après fermeture de l'alvéole »

L'étape « Après fermeture de l'alvéole » correspond à la configuration dans laquelle l'alvéole est scellée par un bouchon d'argile gonflante confiné mécaniquement par deux massifs d'appui en béton (Figure 10.4.3). À ce stade, la galerie de liaison est toujours accessible et le retrait des colis reste techniquement possible bien que nécessitant des opérations plus complexes qu'à l'étape précédente. En effet l'accès aux colis nécessite au préalable le démantèlement du scellement et la remise en état de la galerie d'accès à l'alvéole ainsi que du sas de radioprotection.

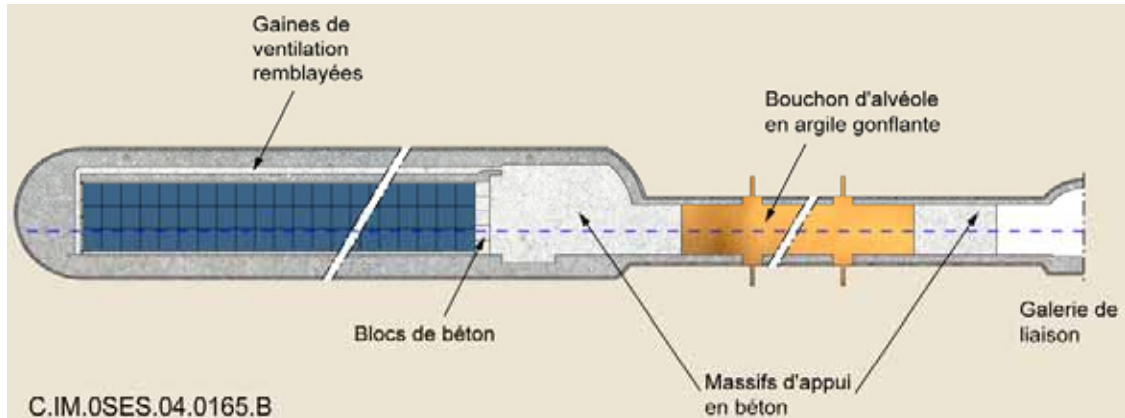


Figure 10.4.3 Alvéole remplie de colis B après scellement

● Le processus de remise en état d'exploitation de l'alvéole

Après fermeture de l'alvéole, l'opération de retrait des colis, stricto sensu, est précédée d'une phase de caractérisation de l'état de l'alvéole et des colis qu'elle contient. Les résultats de cette caractérisation sont ensuite utilisés pour définir les travaux préalables à entreprendre pour remettre l'alvéole en état d'exploitation.

Le contrôle de l'atmosphère de l'alvéole

Le contrôle de l'atmosphère de l'alvéole peut être réalisé à partir d'un forage horizontal tubé depuis l'entrée de la galerie et traversant tout le scellement jusqu'à la partie interne du remplissage en béton de la tête d'alvéole (Figure 10.4.4). Ce forage serait réalisé sous atmosphère neutre maintenue par un sas.

Une fois le forage effectué, il est possible de remettre, si besoin, l'alvéole à la pression atmosphérique et de contrôler son atmosphère. Ce contrôle consiste à prélever et analyser un échantillon gazeux à partir du forage effectué dans le scellement. Il a pour objectif de vérifier la teneur de l'échantillon en hydrogène et en gaz radioactifs. Dans le cas où la teneur en hydrogène de l'atmosphère de l'alvéole serait supérieure à la limite inférieure d'explosivité (4 % d'hydrogène), un renouvellement de l'atmosphère de l'alvéole doit être effectué. Le contrôle atmosphérique est réalisé au plus près de l'alvéole par un dispositif mobile comprenant notamment une pompe à vide, un filtre de sécurité, un manomètre et un détecteur d'hydrogène.

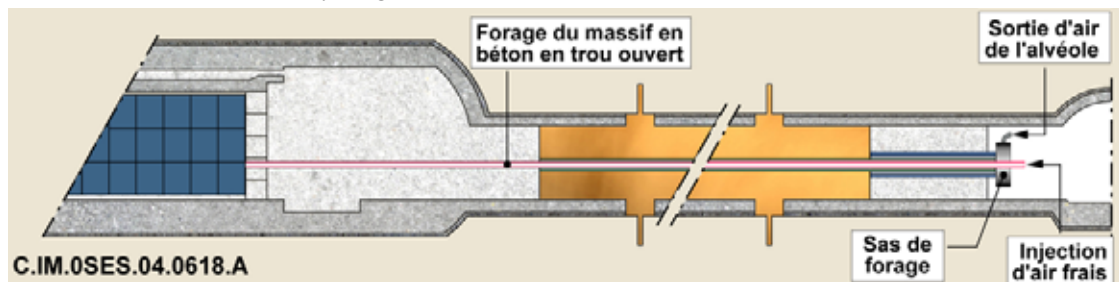


Figure 10.4.4 Contrôle de l'atmosphère d'une alvéole B par forage

La ventilation de l'alvéole

Une fois le forage terminé, il est préférable, pour la suite des opérations, de ventiler l'alvéole pour évacuer l'hydrogène (surtout pour les alvéoles contenant les colis types B2/B3/B4/B6.4) et les éventuels radionucléides gazeux dégagés par les colis. La ventilation permet également de réduire la température en paroi de galerie d'accès dans le cas des alvéoles contenant des colis faiblement exothermiques (colis type B1 et surtout B5).

La ventilation d'une alvéole de 250 mètres de longueur nécessite d'envoyer de l'air frais à une extrémité et de récupérer l'air vicié à l'autre extrémité.

Plusieurs solutions sont envisageables pour rétablir la ventilation. L'une d'entre elles consiste à percer une galerie d'air construite spécifiquement pour le retrait des colis permettant l'évacuation de l'air par le fond des alvéoles (Figure 10.4.5 et Figure 10.4.6)

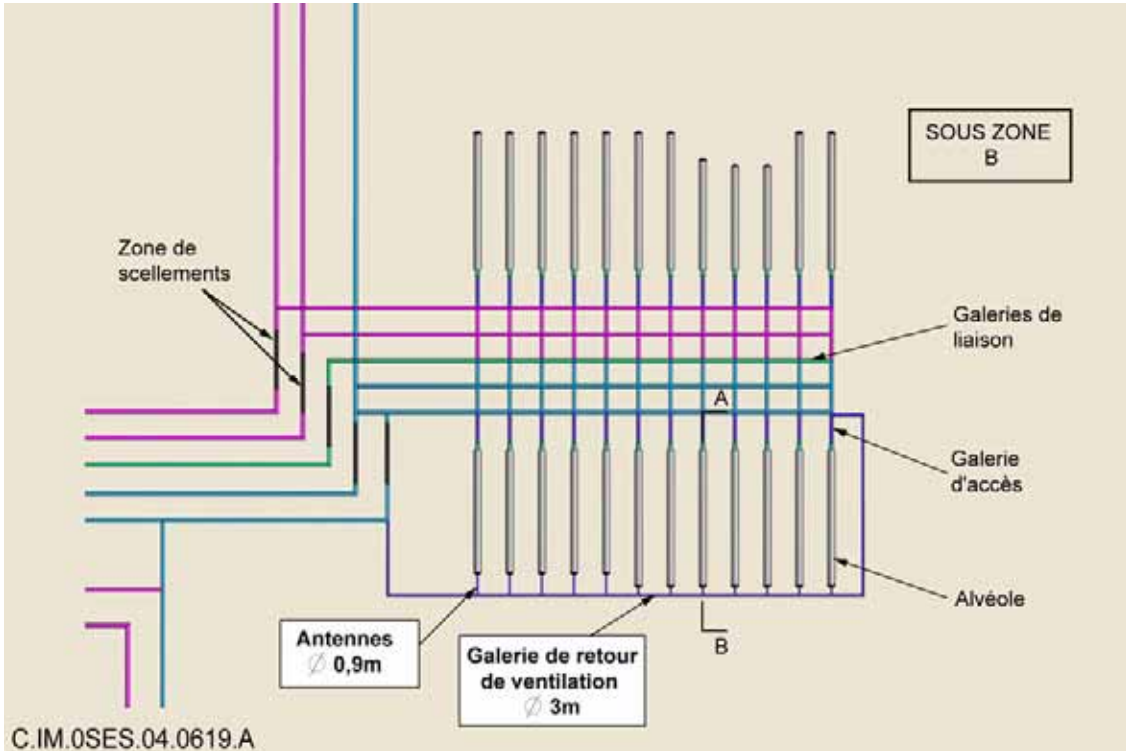


Figure 10.4.5 Vue de dessus de la galerie d'aérage avec antennes

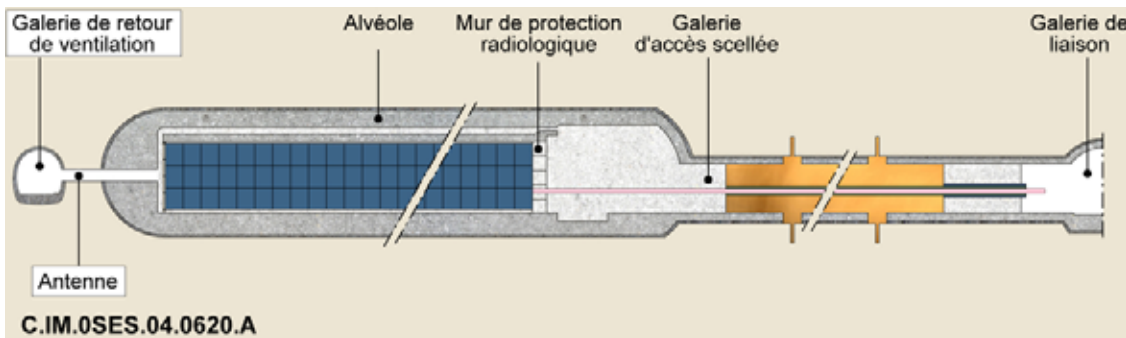


Figure 10.4.6 Réalisation de la galerie de retour de ventilation.

La déconstruction du scellement et la remise en état de la galerie d'accès

La remise en état opérationnel de la galerie d'accès consiste à dégager le scellement jusqu'au revêtement, puis à remettre en place les mêmes équipements que ceux retenus pour la mise en stockage. Une machine de creusement de type « machine à attaque ponctuelle » présente l'adaptabilité requise pour déblayer les différents matériaux du scellement (argile compactée et béton) sans altérer le revêtement de la galerie. Les parties de revêtement démontées au niveau des saignées sont reconstituées par du béton coffré. Les zones du revêtement qui présenteraient des irrégularités de surface après creusement seraient réparées par des techniques de génie civil classique.

Les travaux de déconstruction sont terminés lorsque le mur de protection biologique constitué de blocs en béton est atteint.

La Figure 10.4.7 décrit le processus de déconstruction. Le temps nécessaire pour déblayer le scellement et remettre en état la galerie d'accès est approximativement identique au temps nécessaire pour construire cette galerie.

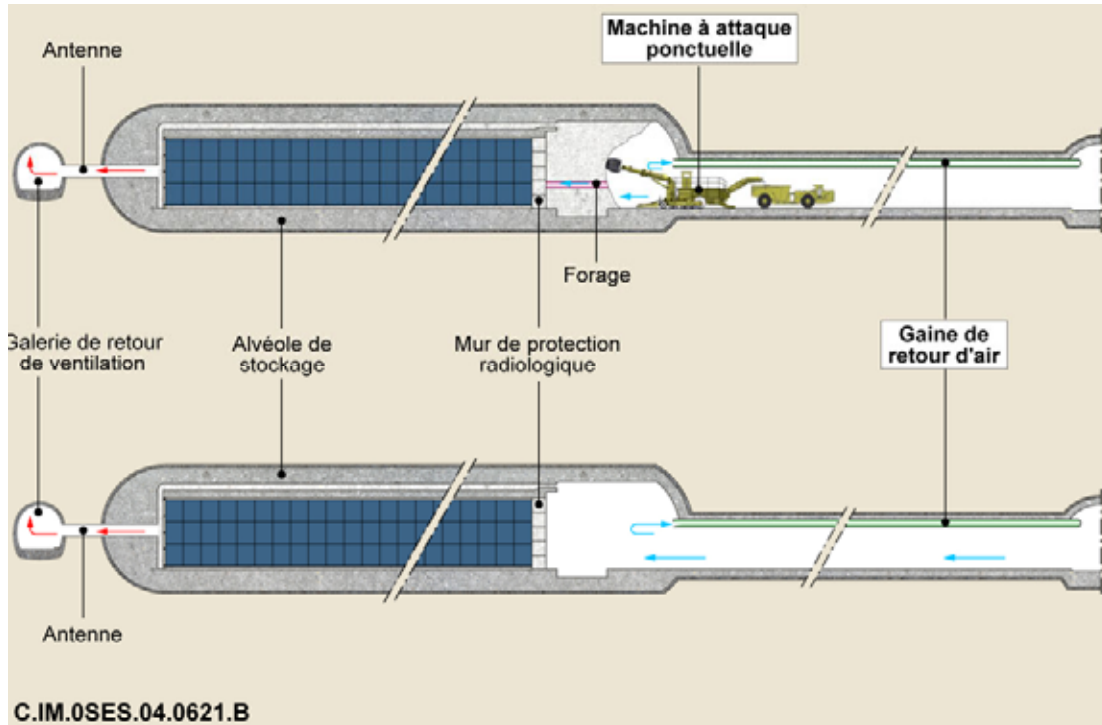


Figure 10.4.7 Processus de déconstruction du scellement

Le rééquipement de la tête d'alvéole (Galerie d'accès)

Une fois la galerie d'accès dégagée, il est alors possible de rééquiper la tête d'alvéole pour reconstituer le sas de radioprotection (Figure 10.4.8). L'équipement est similaire à celui initialement utilisé lors de la mise en place des colis. Dans un premier temps, les portes blindées sont remises en place à l'abri du mur de protection biologique constitué de blocs en béton. Dans un deuxième temps, les autres équipements du sas sont remontés (plancher mobile équipé d'un plateau tournant et porte d'accostage). (voir section 9.3).

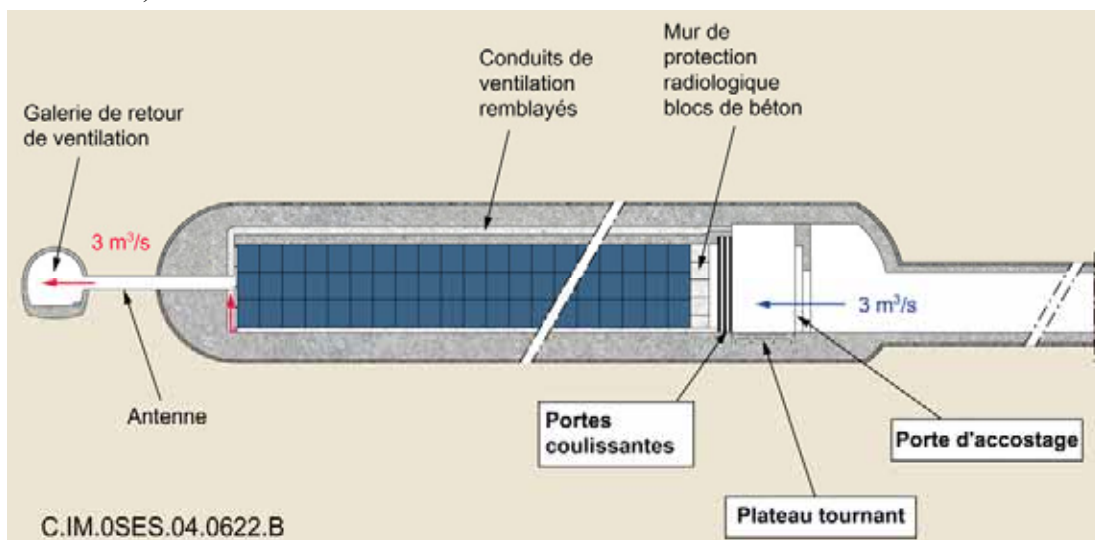


Figure 10.4.8 Alvéole B reconstruite

- **Le processus de retrait des colis**

Une fois le sas opérationnel, les blocs en béton sont retirés avec le même procédé ayant servi à leur mise en place et le retrait des colis s'effectue avec les mêmes précautions que celles mentionnées à l'étape précédente. Toutefois, le bon fonctionnement du processus et de l'équipement de retrait décrit ci-avant est subordonné à l'état de l'alvéole et des colis. Plusieurs phénomènes sont de nature à entraver cette opération. Ces phénomènes sont essentiellement liés aux risques induits par l'évolution des colis et des ouvrages sur une très longue période de temps. Les principaux risques et les mesures permettant de les maîtriser sont décrits à la section suivante.

10.4.1.4 Analyse des situations susceptibles de gêner la reprise des colis de l'alvéole

- **Les risques liés à l'évolution du revêtement d'alvéole**

Pendant plusieurs siècles, la structure de l'alvéole reste stable mécaniquement et ne subit que peu d'altération. Le revêtement est toujours suffisamment rigide pour empêcher la convergence des parois de l'alvéole. Toutefois, il n'est pas à exclure que quelques écaillages du béton puissent se produire en surface du béton de remplissage pouvant nécessiter l'intervention d'un engin équipé d'un bras manipulateur pour retirer les débris.

- **Les risques liés à l'évolution des colis primaires.**

Pour une grande partie de l'inventaire, les colis primaires dégagent de l'hydrogène. La conception des colis de stockage assure l'évacuation de l'hydrogène produit, même en présence d'humidité et évite ainsi les risques liés à la mise en pression du colis de stockage.

Le jeu résiduel existant entre les colis primaires et les parois des logements internes du colis de stockage est suffisant, bien que faible, pour prévenir tout risque d'éclatement du colis de stockage dans le cas d'une éventuelle corrosion du colis primaire et d'un effet de gonflement des produits formés.

- **Les risques liés à l'évolution du colis de stockage**

Les risques à analyser sont de deux natures : détérioration du colis de stockage et accrochage mécanique d'un colis sur un autre colis ou sur le radier.

Le choix du béton pour la constitution des colis de stockage permet d'assurer une durabilité mécanique pluriséculaire et l'absence de phénoménologie pouvant conduire à une solidarisation au contact des surfaces béton/béton.

- **Les risques liés à la corrosion des rails utilisés par l'engin de retrait**

La ventilation de l'alvéole avec de l'air sec et frais avant le scellement de l'alvéole et l'absence d'apport d'oxygène dans la phase qui suit devraient fortement limiter la corrosion des rails et de leurs points d'attache. Le système de roulement sur rail est tolérant à une légère corrosion. En tout état de cause, il est possible de prévoir un engin de nettoyage des rails dans la zone libérée au fur et à mesure du retrait des colis et ainsi de s'affranchir de tout risque de coincement à une distance importante de la tête d'alvéole. La fixation des rails au sol est assurée par un grand nombre de points dont une légère corrosion n'altérerait pas le fonctionnement mécanique.

- **Les risques liés à la présence dans l'alvéole de gaz contaminés ou d'hydrogène**

Lors des opérations de retrait, l'alvéole est ventilée. Le risque d'atmosphère explosive est géré par un contrôle d'atmosphère et une ventilation réalisée dans des conditions identiques à celles qui ont prévalu au moment de la mise en place initiale.

10.4.2 Le retrait des colis de déchets C (et de combustibles usés)

10.4.2.1 Les facteurs de conception favorables au retrait des colis

La conception des colis et des alvéoles de stockage est caractérisée par trois éléments importants de nature à favoriser une opération éventuelle de retrait : l'existence d'un jeu de manutention pérenne, la durabilité des conteneurs de stockage et la présence d'éléments céramique isolant les colis du chemisage de l'alvéole.

- **La pérennité de la stabilité du revêtement de l'alvéole**

Le premier facteur de conception favorable au retrait des colis est lié au dimensionnement du chemisage. L'épaisseur de ce dernier est en effet calculée pour limiter les déformations longitudinales et radiales sur une durée séculaire à pluriséculaire. Elle contribue ainsi à préserver, pendant cette période, le jeu de manutention entre le chemisage et le colis et facilite donc le retrait éventuel (Figure 10.4.9).

- **La durabilité des conteneurs de stockage**

Le deuxième facteur de conception favorable au retrait des colis est la durabilité des conteneurs de stockage (4 000 ans pour les colis C et 10 000 ans pour les colis de combustibles usés).

- **L'isolation des colis de stockage par des éléments céramique**

Le troisième facteur de conception favorable au retrait est lié à la présence de patins céramique fixés sur les colis de stockage C et de combustibles usés de type CU2. Dans le cas des combustibles usés de type CU1, une disposition similaire consiste à revêtir de céramique les rails solidaires du chemisage sur lesquels sont déposés les colis. La céramique évite le contact acier/acier avec le chemisage et prévient de ce fait les phénomènes de collage par corrosion qui sont susceptibles de se produire lorsque deux aciers de même nature sont en contact. Le bouchon de protection radiologique est revêtu de céramique pour la même raison.

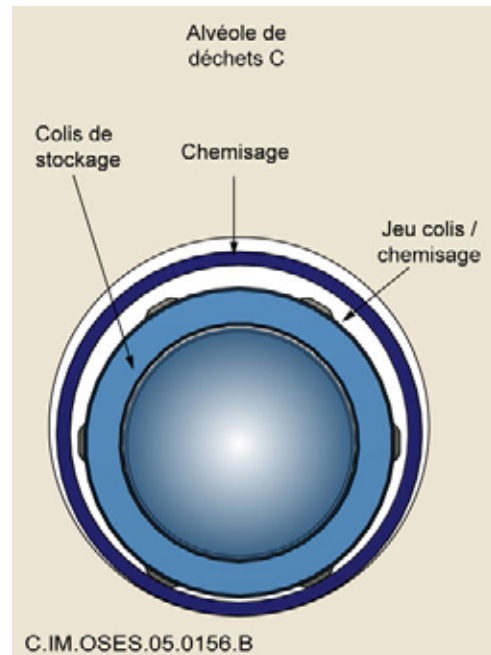


Figure 10.4.9 Jeu fonctionnel entre un colis et le chemisage d'une alvéole C

10.4.2.2 Conditions de retrait à l'étape « Après mise en place des colis »

Cette étape correspond à une configuration dans laquelle l'ensemble des colis C (ou CU) a été mis en place dans l'alvéole (Figure 10.4.10). Un bouchon métallique est placé à l'intérieur de l'alvéole pour assurer la protection radiologique du personnel présent dans la galerie d'accès. La tête d'alvéole est équipée dans un premier temps de l'operculaire ayant servi à l'introduction des colis, puis dans un deuxième temps d'un simple capot d'étanchéité. Ces dispositifs mécaniques peuvent être ouverts à tout moment pour procéder au retrait des colis. La ventilation de la galerie d'accès est maintenue en service.

Durant cette étape, la gestion des colis stockés peut ainsi s'effectuer comme dans un entreposage à l'échelle séculaire à pluriséculaire. Cependant, le retrait des colis peut être précédé d'une phase de contrôle opérationnel de la tête d'alvéole.

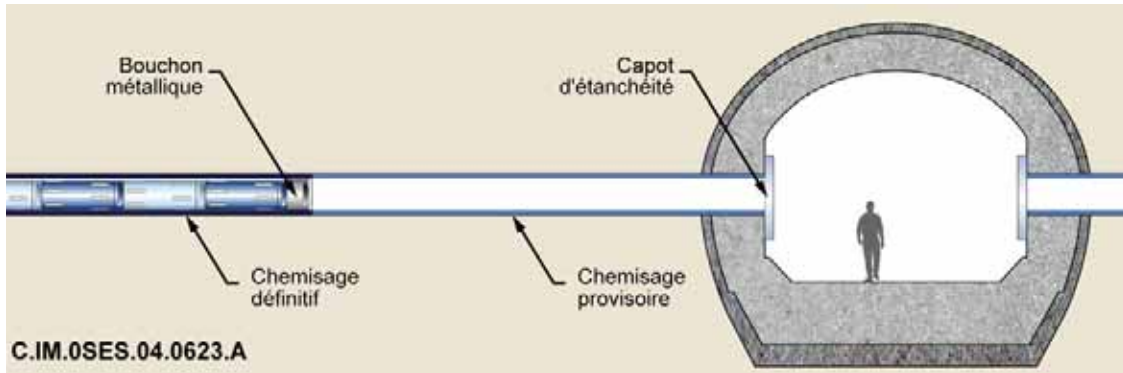


Figure 10.4.10 Alvéole C en fin d'exploitation

● Le processus préalable de contrôle du caractère opérationnel de la tête d'alvéole

La modélisation thermique a montré que la température des parements de galeries ne dépasse pas le seuil réglementaire de 60 °C, même en considérant l'arrêt de la ventilation immédiatement après le chargement de toute la zone de stockage C ou CU. Dans le cas où la ventilation du module ou de la zone de stockage concernée aurait été arrêtée, il serait nécessaire de la remettre en route en préalable à toute intervention dans le but d'atteindre les valeurs réglementaires de température de l'air ambiant. Ces valeurs sont comprises entre 26 et 32 °C suivant la nature du poste de travail et les conditions d'hygrométrie de l'air. La durée d'un tel préavis de ventilation est estimée à quelques heures.

Il est ensuite possible de contrôler, par mesure de précaution, que l'atmosphère de l'alvéole est conforme à l'état attendu. Ce contrôle peut s'effectuer à partir de piquages prévus dans l'operculaire ou dans le capot d'étanchéité.

Si l'operculaire n'est plus en place, le capot d'étanchéité qui lui a été substitué est retiré pour effectuer un contrôle visuel et dimensionnel de la tête d'alvéole. Pour ce faire, les opérateurs sont protégés du rayonnement par le bouchon métallique de protection biologique. Le contrôle a pour objectif de vérifier l'état du chemisage provisoire et de l'empreinte de manutention du bouchon métallique. Le jeu fonctionnel entre ce bouchon et le chemisage est aussi vérifié.

Ces contrôles (visuels, dimensionnels et de température) peuvent être effectués avec des équipements standard. Il s'agit essentiellement de caméras, d'appareils optiques à laser et de thermomètres.

À l'issue de ces contrôles, l'alvéole est rééquipée avec un operculaire pour permettre l'accostage de la hotte et des équipements de manutention.

L'alvéole est alors prête pour permettre le processus de reprise des colis. La durée de remise en état de l'alvéole est estimée à quelques jours.

● Le processus de retrait des colis

L'équipement nécessaire au retrait est similaire à celui utilisé pour la mise en place des colis. Il est constitué d'une hotte de protection dotée d'équipements fixes et d'un robot mobile. L'équipement fixe est composé d'un treuil et d'une centrale hydraulique.

La composante spécifique de ce matériel par rapport à celui de mise en stockage réside essentiellement dans le robot et le treuil qui lui est associé. En effet, bien que le robot pousseur des colis C ou l'aéroporteur des colis CU permettent de retirer les colis, il peut être envisagé d'utiliser un matériel plus adapté à cette fonction particulière.

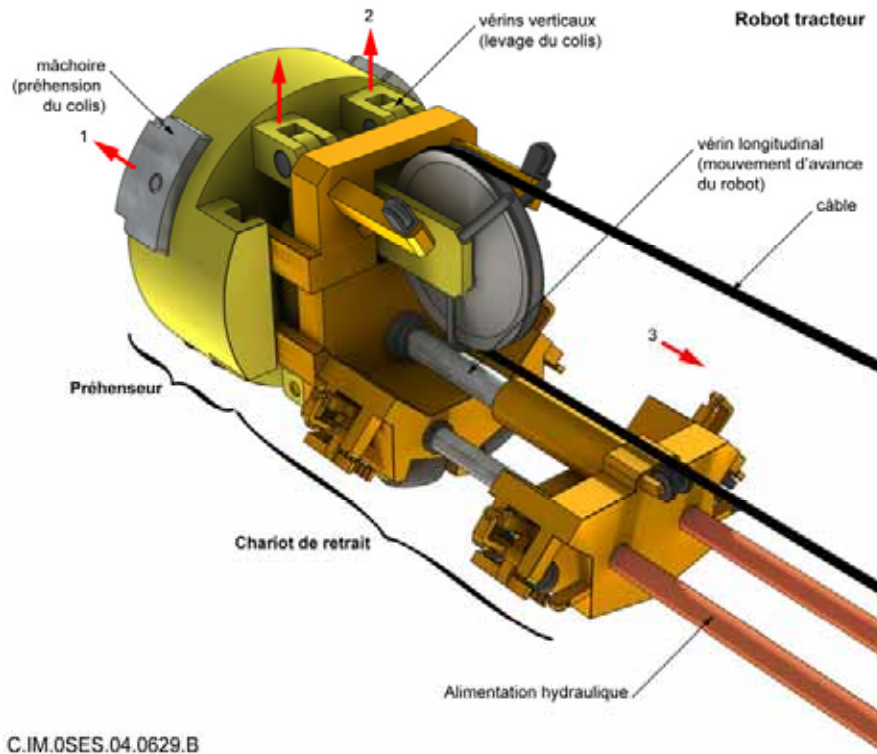
Deux fonctions complémentaires sont allouées à cet équipement spécifique. La première fonction est de vaincre les forces de frottement engendrées par la corrosion éventuelle du chemisage en mettant en œuvre une force de traction importante sur le colis à retirer. La deuxième fonction est liée à la possibilité d'un collage entre les colis et le chemisage, bien que peu probable du fait des précautions prises pour éviter ce phénomène (fermeture étanche de l'alvéole, patins en céramique). Pour faire face

éventuellement à une telle situation, le robot est conçu pour pouvoir soulever la tête du colis (ou du bouchon) et ainsi « décoller » le colis du chemisage.

Le robot est relié à l'équipement fixe par l'intermédiaire d'un ombilical. Cet ombilical a pour fonction de transmettre au colis l'effort de traction exercée par le treuil et d'alimenter le robot en fluide hydraulique.

La hotte est conçue pour être accostée à la tête d'alvéole dans les mêmes conditions que lors des opérations de mise en stockage.

● Description du robot tracteur et du treuil associé



C.IM.0SES.04.0629.B

Figure 10.4.11 Exemple de robot tracteur utilisé pour la reprise des colis

Le robot tracteur (Figure 10.4.11) est un appareil entièrement hydraulique. Il assure trois fonctions réalisées successivement : la translation du corps de robot de la hotte jusqu'au colis à retirer, la préhension du colis et le levage de la tête du colis. Une étude préliminaire a permis de confirmer que son gabarit est comparable à celui du robot pousseur utilisé pour la mise en place. Il est compris dans un cylindre de diamètre équivalent à celui du colis retiré et de longueur inférieure à 2 mètres.

La préhension du colis est réalisée, comme à la mise en place, par un dispositif d'arrimage constitué de trois mâchoires actionnées par vérins hydrauliques.

La translation du robot est réalisée d'une façon similaire à celle du robot de mise en stockage. Le principe consiste en un mouvement d'avance pas à pas à l'aide d'un vérin longitudinal et de vérins latéraux. Ce système présente l'avantage d'être peu sensible à une altération de l'état de surface du chemisage. Il offre également la possibilité d'effectuer une forte poussée sur le colis en cas de besoin.

Le décollage de la tête du colis, fonction spécifique aux opérations de retrait, est réalisé à l'aide de deux vérins hydrauliques verticaux, situés en tête du chariot de retrait, qui permettent de soulever légèrement la tête du colis pour faciliter les opérations de retrait (Figure 10.4.12).

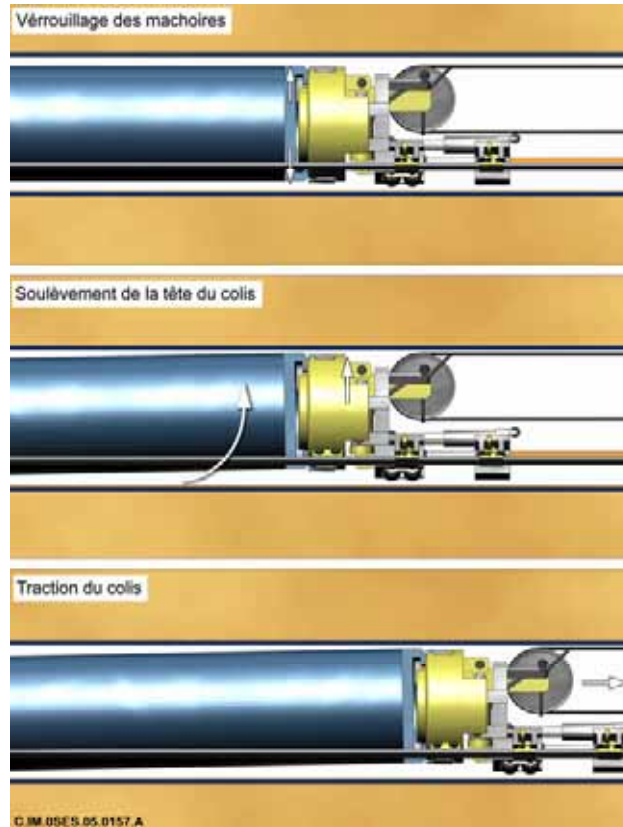


Figure 10.4.12 Principes de préhension et de retrait des colis stockés

Le treuil de retrait envisagé est capable d'un effort de traction d'environ 160 kN dans le cas des colis C et 800 kN dans le cas des colis de combustibles usés. L'effort de traction est transmis au robot et donc au colis à retirer par l'intermédiaire d'un système multicâbles à poulies.

Comme lors de la mise en place, l'ensemble des opérations est réalisé de façon semi-automatique sous le contrôle d'un opérateur situé dans le poste de commande de la navette d'accostage en suivant une procédure inverse à celle ayant servi pour la mise en place.

10.4.2.3 Conditions de retrait à l'étape « Après fermeture de l'alvéole »

L'étape « Après fermeture de l'alvéole » correspond à la configuration dans laquelle l'alvéole est scellée par un bouchon d'argile gonflante confinée mécaniquement par un bouchon de béton (Figure 10.4.13). La galerie d'accès est toujours accessible.

À ce stade, le retrait des colis reste techniquement possible. Cependant, comme à l'étape précédente, cette opération doit être précédée d'une phase préalable de remise en état de la tête d'alvéole.

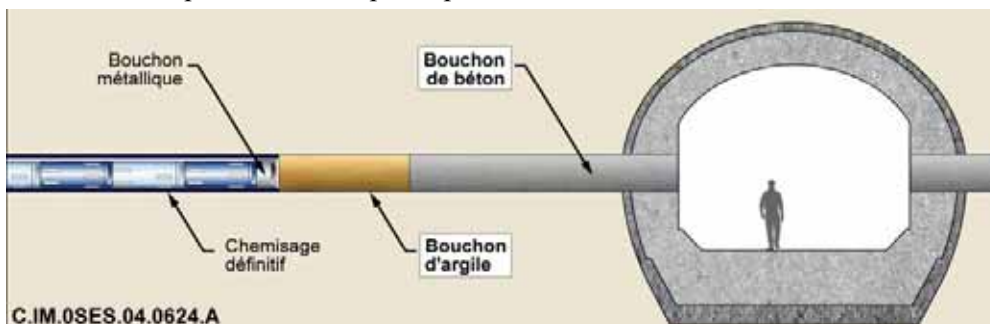


Figure 10.4.13 Alvéole C scellée

● Le processus préalable de remise en état de la tête d'alvéole

Ce processus se distingue du précédent par le fait que l'accès au colis nécessite une déconstruction partielle du scellement et la reconstruction de la tête d'alvéole.

Il commence, comme à l'étape précédente, par le contrôle de l'atmosphère de l'alvéole. Cependant, il doit s'effectuer à travers le scellement par un forage de petit diamètre. Ce forage doit être réalisé, par mesure de précaution, sous atmosphère neutre maintenue par un sas. Le contrôle de l'atmosphère permet ensuite de vérifier que l'alvéole est conforme à l'état attendu.

La déconstruction du scellement et la remise en état de la tête d'alvéole

La déconstruction du scellement d'alvéole consiste à enlever ce dernier et à remettre en place un tubage de soutènement (Figure 10.4.14). Ce dernier est destiné à faciliter la mise en place ultérieure d'un chemisage provisoire. Le diamètre du tubage de soutènement est 200 mm plus grand que celui du chemisage définitif pour tenir compte d'une déviation potentielle de l'axe du forage de 1%. Ce creusement peut être réalisé par une foreuse horizontale (micro tunnelier à moteur externe et outil rétractable) avec mise en place à l'avancement du tubage de soutènement.

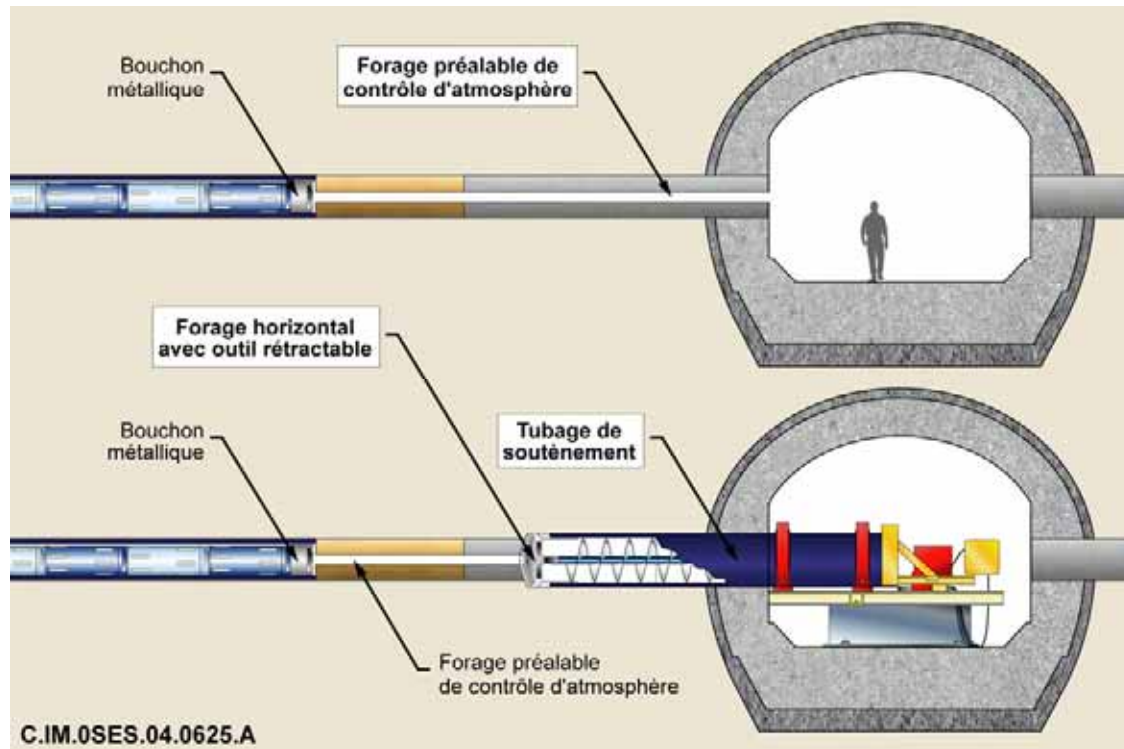


Figure 10.4.14 Forage du scellement d'alvéole C

Cette opération est terminée lorsque l'outil de forage du micro tunnelier entre en contact avec l'extrémité du chemisage définitif de l'alvéole. Il est alors possible de rétracter la tête de forage pour finir la poussée du tubage de soutènement et permettre le retrait du micro tunnelier.

Une fois le tubage de soutènement mis en place, le chemisage provisoire peut alors être connecté au chemisage définitif (Figure 10.4.15). Les diamètres intérieurs des deux chemisages sont choisis identiques pour minimiser la discontinuité à la jonction. Le chemisage provisoire est amené au contact par le pousse-tube de l'équipement utilisé précédemment. Le bon alignement entre les deux chemisages est permis par un centreur à extrémité conique poussé par un train de tige. L'alignement correct entre les deux chemisages est assuré par une collerette de raccordement placée à l'extrémité du chemisage provisoire. Cette collerette vient coiffer l'extrémité du chemisage définitif et assure une liaison mécanique entre les deux parties du chemisage reconstitué.

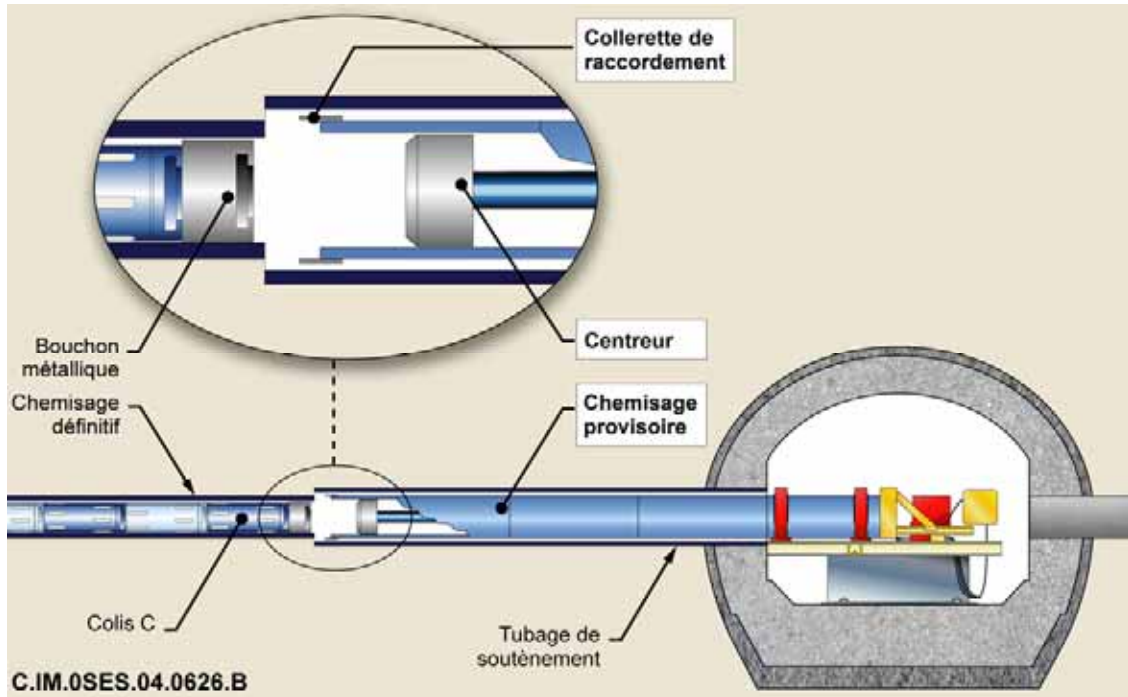


Figure 10.4.15 Reconstruction de la tête d'alvéole C

Le chemisage provisoire est ensuite aligné au laser optique sur le chemisage définitif. En effet, l'axe de ce tube, de 9 mètres de long, doit être aligné sur celui du chemisage définitif pour éviter les risques de coincement dans la zone de raccordement. Il est ensuite fixé par soudage à l'entrée de la tête d'alvéole sur le tubage de soutènement.

Le rééquipement de la tête d'alvéole

Le rééquipement consiste à remettre en place l'operculaire suivant une procédure similaire à celle retenue pour la mise en place. L'alvéole est alors prête pour permettre la reprise des colis (Figure 10.4.16). La durée du processus de remise en état de l'alvéole est évaluée à environ une semaine.

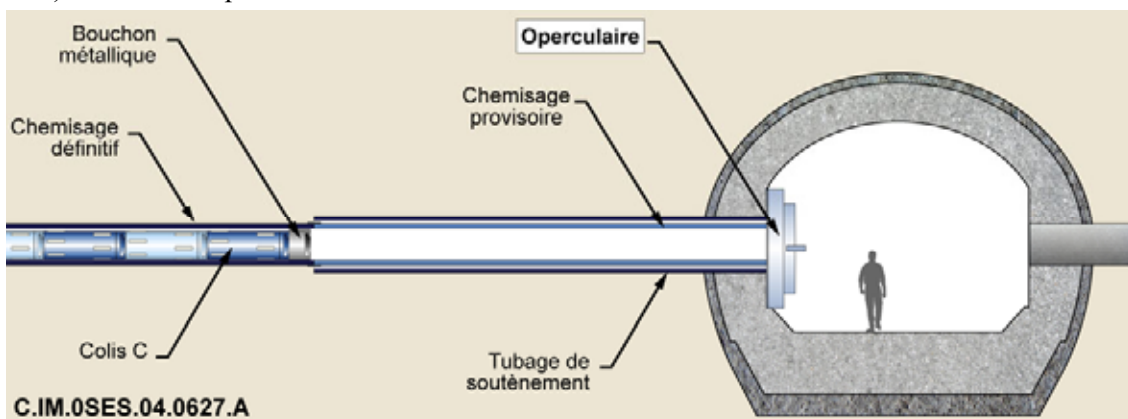


Figure 10.4.16 Alvéole C après reconstruction

● Le processus de retrait des colis C et CU

Une fois l'alvéole remise en état, le processus de retrait est le même que celui décrit à l'étape précédente.

Toutefois, le bon fonctionnement du processus et de l'équipement de retrait décrit ci-avant est subordonné à l'état de l'alvéole et des colis. Plusieurs phénomènes sont de nature à entraver cette

opération. Ces phénomènes sont essentiellement liés aux risques induits par l'évolution des colis et des ouvrages sur une très longue période de temps. Les principaux risques et les mesures correspondantes sont décrits dans la section suivante.

10.4.2.4 Analyse des situations susceptibles d'entraver la reprise des colis de l'alvéole

Le risque principal susceptible d'entraver la reprise des colis est lié à une obstruction du jeu fonctionnel par corrosion ou par déformation mécanique du chemisage.

Si, en dépit de toutes les dispositions prises pour empêcher ou limiter les phénomènes de corrosion, le chemisage ou le colis se corrodait malgré tout de façon locale ou plus généralisée, la présence de produits de corrosion conduirait alors à un gonflement de la surface corrodée qui pourrait s'opposer à la reprise des colis, voire provoquer une situation de coincement si les jeux fonctionnels étaient complètement obstrués. Ce dernier risque, peu probable, est prévenu par l'existence d'un jeu fonctionnel pérenne entre le colis et le chemisage (de l'ordre de 3 cm pour les colis C et de 8 cm pour les CU). En effet, même en considérant une vitesse de corrosion très pénalisante de 1 mm par siècle, les jeux ne seront pas comblés avant plusieurs siècles. Les risques « d'enlèvement » du colis sont aussi prévenus par la présence de patins pour les colis C et combustibles usés de type CU2 ou de rails pour les combustibles usés de type CU1 qui maintiennent la génératrice inférieure des colis au-dessus du chemisage.

Enfin, un coincement mécanique des colis de stockage peut également être envisagé en cas d'évolution dimensionnelle du chemisage de l'alvéole. Cependant, ce phénomène est prévenu par l'adoption d'une épaisseur de chemisage calculée pour limiter les déformations longitudinales et radiales sur une durée séculaire à pluriséculaire. Elle permet ainsi de préserver, pendant cette période, le jeu de manutention entre le chemisage et le colis.

10.4.2.5 Conditions de retrait à l'étape « Après fermeture des galeries du module »

La déconstruction des scellements des galeries de liaison peut être réalisée en utilisant le même procédé que celui décrit pour la déconstruction du scellement des alvéoles B.

La déconstruction des remblais s'effectue également avec des techniques minières classiques : du type « machine à attaque ponctuelle ». Ces procédés sont utilisables pour des déblais dont la température atteint 55 °C à condition d'utiliser des engins avec cabines climatisées et de réfrigérer l'air de la galerie au fur et à mesure de son déblaiement. L'utilisation d'installation de réfrigération d'air est une pratique courante dans les mines profondes chaudes, en particulier en Afrique du Sud.

L'état du revêtement de la galerie sera inspecté au fur et à mesure du déblaiement et sera, le cas échéant, renforcé avec des boulons ou des cintres suivant des techniques éprouvées dans le génie civil ou minier.

La durée des opérations de déconstruction d'un scellement sera de l'ordre d'une semaine. La cadence d'un chantier de déblaiement est estimée entre 60 m et 200 m par mois et par galerie, en fonction du besoin de renfort du revêtement de la galerie.

L'accès à toutes les alvéoles d'un module nécessite le déblaiement d'un volume d'environ 60 000 m³. Le temps nécessaire à cette opération serait du même ordre de grandeur que celui du creusement initial de ces galeries.

Les processus de remise en état de l'alvéole et retrait des colis à mettre en œuvre pour les opérations de retrait sont ceux décrits aux paragraphes précédents.

10.4.3 Conclusion sur la capacité à retirer les colis

Tant que le processus de fermeture du stockage n'est pas engagé, la capacité à retirer les colis est totale, comme dans un entreposage, sur des durées pluriséculaire (typiquement 200 à 300 ans) pendant lesquelles la stabilité mécanique des alvéoles est assurée. Si l'on souhaitait prolonger cette étape au-

delà de cette durée, il conviendrait de programmer des interventions spécifiques (retrait des colis, maintenance et travaux de confortement éventuels des alvéoles...).

Après que la fermeture du stockage a été engagée, les opérations de retrait des colis sont possibles, moyennant des travaux préparatoires permettant de restaurer l'accès à l'alvéole avant de procéder au retrait en lui-même. Les conditions de préparation de l'accès aux alvéoles sont naturellement fonction du niveau de fermeture atteint. À mesure de l'avancement du processus de fermeture, l'ampleur des travaux préparatoires croît (de manière relativement proportionnelle au linéaire de galeries à déblayer), mais ne pose pas de problèmes techniques rédhibitoires. La capacité à réaliser l'opération de retrait des colis en elle-même n'est fonction que du maintien de l'intégrité mécanique du revêtement des alvéoles. La possibilité de retirer les colis dans l'alvéole n'est donc pas, ou peu, influencée lors du passage d'une étape du processus de fermeture à la suivante. En effet, tant que le revêtement des alvéoles est stable, c'est-à-dire tant que les jeux fonctionnels entre les colis et les revêtements sont maintenus, le retrait des colis peut être réalisé avec des moyens identiques ou similaires à ceux ayant servi à leur mise en place. Ainsi, d'un point de vue technique, la capacité à retirer les colis est offerte pendant toute la durée de vie des alvéoles c'est-à-dire à minima deux à trois siècles. Si l'on souhaitait prolonger cette possibilité d'action, alors que le processus de fermeture a été engagé, il conviendrait de revenir en arrière jusqu'à l'accès aux alvéoles pour programmer des interventions spécifiques telles que celles évoquées ci-dessus.

10.5 Conclusion

La possibilité de gérer le stockage de manière réversible résulte tout d'abord de la stabilité des ouvrages de stockage conçus pour perdurer sur de très longues durées sans maintenance.

En effet, le choix de revêtements durables en paroi d'ouvrages offre à l'exploitant, pendant une durée de plusieurs siècles et tant que le processus de fermeture n'est pas initié, une capacité à retirer facilement les colis avec des moyens identiques ou similaires à ceux ayant servi à leur mise en place. La gestion des colis s'effectue alors comme dans un entreposage. La stabilité des ouvrages de liaison, qu'il s'agisse des puits ou des galeries, n'induit pas de limite temporelle à cette phase, car ces ouvrages, contrairement aux alvéoles, peuvent faire l'objet d'une maintenance régulière. Le stockage peut ainsi être maintenu dans un état totalement réversible, tant que les alvéoles de stockage sont intègres, c'est-à-dire pendant une durée de deux ou trois siècles et vraisemblablement plus.

En outre, la conception modulaire de l'architecture souterraine permet une mise en œuvre progressive du processus de stockage tant au niveau de la mise en alvéole des colis de déchets que de la fermeture des installations. La première étape de mise en alvéole ne concernerait d'abord qu'une fraction de l'inventaire des déchets. Cette progressivité du processus de stockage se traduit, notamment pour la fermeture, par une succession d'étapes. Chaque étape est précédée par un jalon à caractère décisionnel qui ne concerne que le contenu de l'étape à venir. Ainsi, la première étape du processus de fermeture ne concernerait que le scellement des alvéoles de certains modules, les autres composantes de l'architecture restant accessibles et maintenues.

En complément de cette progressivité, des moyens d'observation mis en œuvre dès la construction des ouvrages permettent de suivre leur évolution et d'évaluer plus précisément leur durée de stabilité au-delà d'un siècle d'existence. L'observation et la surveillance du stockage sont ainsi des outils d'aide à la gestion du stockage. En effet, les décisions à prendre lors du passage d'une étape à la suivante s'appuient sur la compréhension scientifique de l'évolution des ouvrages et de leur environnement.

La mise en œuvre d'une fermeture progressive des installations souterraines conduit à une diminution progressive du niveau de réversibilité. Conjointement, elle s'affranchit progressivement de l'intervention humaine avec un objectif de sûreté passive. Cependant une opération de retrait des colis reste toujours techniquement possible après le scellement des alvéoles et le remblaiement des galeries. L'enlèvement des matériaux de remblayage ne pose pas de difficultés techniques et le maintien de l'intégrité des alvéoles pendant une durée de plusieurs siècles faciliterait l'opération de retrait en elle-même.

Enfin, il est également important de noter que la progressivité du processus de stockage offre la possibilité de tirer parti du retour d'expérience des premières phases du processus et de faire évoluer en conséquence la conception des ouvrages de stockage ainsi que les moyens et les procédés de construction, d'exploitation et de fermeture. En particulier, la coexistence possible d'alvéoles, de galeries ou de modules dans des états de réversibilité différents autorise différents scénarios de gestion et permet de tester des configurations variées, confortant ainsi la flexibilité d'ensemble.

11

La sûreté opérationnelle

11.1	Évaluation dosimétrique en exploitation des installations	438
11.2	Analyse de risque	444
11.3	Étude du risque lié à l'émission de gaz explosifs par des colis de déchets B	456
11.4	Étude du risque d'incendie dans les installations souterraines du stockage	458
11.5	Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de transfert des hottes (B, C et CU)	466
11.6	Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de manutention des colis B.....	471
11.7	Étude des conséquences d'une chute de cage lors du transfert des colis de stockage en puits	473
11.8	Étude des conséquences d'une chute de colis de stockage B lors de sa mise en place en alvéoles de stockage.....	479
11.9	Synthèse de l'analyse	484

Comme pour toute autre installation industrielle, les différentes activités du stockage (construction, exploitation et fermeture) peuvent induire des risques pour les personnes, le public ou l'environnement.

Ce chapitre présente une première analyse de sûreté opérationnelle qui correspond au niveau actuel de connaissance des installations du stockage et qui prend en compte le retour d'expérience d'installations comparables. Cette analyse permet de s'assurer que les risques sont maîtrisés par des dispositions de conception et d'exploitation en conformité avec les fonctions de sûreté¹⁴⁴ en exploitation définies par l'Andra.

Dans le cadre de cette analyse, une évaluation dosimétrique préliminaire en exploitation des installations est présentée.

Un bilan de l'analyse de risque est également exposé. Il permet de mettre en exergue certains risques particuliers qui ont fait l'objet d'études complémentaires compte tenu de leur spécificité ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements.

Ce chapitre présente ensuite une analyse des risques particuliers précédemment identifiés : le risque d'explosion lié à l'émission de gaz par certains colis de déchets, les risques d'incendie dans les installations souterraines en configuration de construction et d'exploitation, le risque de chute de la cage dans le puits de descente des colis lors d'un transfert et le risque de chute d'un colis B lors de sa mise en alvéole. Enfin, une synthèse de l'analyse est donnée en conclusion.

11.1 Évaluation dosimétrique en exploitation des installations

L'exploitation d'installations dans lesquelles sont réalisées des opérations de réception, de conditionnement, de manutention et de stockage des déchets nucléaires présente, en raison de la nature des colis de déchets, des risques radiologiques pour les personnes. Ces risques sont de plusieurs natures : risques d'exposition externe (par irradiation) et risques d'exposition interne (par inhalation ou par ingestion).

Cette section présente une première évaluation dosimétrique qui tient compte des dispositions de prévention envisagées vis-à-vis des risques radiologiques. Ces dispositions doivent permettre de limiter l'exposition des personnes en deçà des contraintes de dose annuelle que s'est fixée l'Andra comme objectifs de radioprotection, soit 5 mSv pour le personnel travaillant en zone nucléaire et 0,25 mSv pour le public hors site [37].

Cette évaluation dosimétrique accompagne la démarche de conception des installations vis-à-vis des risques radiologiques, mais ne s'inscrit pas, à ce stade, dans une démarche d'optimisation des doses reçues.

¹⁴⁴ Les fonctions de sûreté définies (cf. section 2.2) sont les suivantes :

- protéger les personnes contre l'irradiation ;
- confiner la radioactivité ;
- maîtriser le risque de criticité ;
- évacuer la puissance thermique résiduelle des colis de stockage ;
- évacuer les gaz de radiolyse émis par certains colis.

11.1.1 Nature des risques radiologiques et des dispositions envisagées

Les différents risques radiologiques qui concernent les installations du stockage sont exposés dans les sections qui suivent.

11.1.1.1 Risque d'exposition externe

Les colis de déchets sont sources d'exposition externe (liée aux rayonnements β , γ et aux neutrons) depuis leur réception dans les installations de surface jusqu'à leur mise en stockage dans les installations souterraines.

Les emballages de transport contenant les colis primaires livrés sur le site de stockage, ont une fonction de protection radiologique et leur structure est conçue en fonction des caractéristiques radiologiques propres aux déchets transportés. Une fois extraits de leurs emballages, les colis primaires sont manutentionnés et placés en conteneurs de stockage. Ces opérations sont réalisées à l'intérieur de cellules inaccessibles aux opérateurs qui interviendront à distance derrière des écrans de protection radiologique (murs, hublots).

Lors des opérations de transfert jusqu'à la mise en place en alvéoles de stockage, la maîtrise du risque d'exposition externe passe par l'interposition d'écrans de protection radiologique¹⁴⁵ entre les sources radioactives et les personnes pour atténuer les flux de rayonnement. Les hottes de transfert des colis de stockage, les operculaires des alvéoles C et CU ainsi que les portes des alvéoles B jouent ce rôle. La protection ou l'éloignement du poste de commande des engins utilisés pour le transfert ou pour l'introduction des colis en alvéole contribuerait aussi à diminuer les doses reçues par le personnel.

Pendant les opérations de fermeture, des écrans de protection définitifs sont mis en place tels que des blocs de béton pour remplacer les portes métalliques des alvéoles de stockage B et des bouchons métalliques pour les alvéoles C et CU (cf. chapitre 5). Ces dispositifs faciliteraient les opérations de retour en arrière éventuelles (retrait des colis).

11.1.1.2 Risque d'exposition interne par inhalation de gaz radioactifs émis par les colis de stockage

Certains colis de stockage B (B2 et B5) émettent de faibles quantités de gaz radioactifs (tritium, carbone 14...).

Dans les installations de surface, le nombre limité de colis de déchets présents est tel que la quantité de gaz émis est négligeable. De plus, la plupart des opérations sont réalisées dans des cellules dont l'accès est interdit au personnel.

Au cours du transfert des colis de stockage dans les installations souterraines jusqu'aux alvéoles de stockage, les traces de gaz radioactifs émis par ces colis sont libérées dans les galeries de transfert et relâchées via le circuit de ventilation générale.

Dans les alvéoles de stockage où un grand nombre de colis est stocké, la ventilation avec une extraction de l'air par gaines jusqu'au puits de retour d'air du stockage (cf. section 6.4) permet d'évacuer ces gaz sans affecter le personnel présent dans les installations souterraines.

¹⁴⁵ La nature du matériau de ces écrans dépend du type de rayonnement émis par la source radioactive :

- pour les rayonnements γ , les matériaux employés sont des matériaux lourds tels que l'acier, le béton, le verre au plomb ;
- pour les rayonnements neutroniques, ce sont des matériaux spécifiques (avec bore ou cadmium,...) ou des matériaux hydrogénés ;
- les rayonnements α et β ne nécessitent pas d'écran de nature particulière car ils sont arrêtés par l'enveloppe de colis.

11.1.1.3 Risque d'exposition interne par inhalation de gaz radon émis par les terrains dans les installations souterraines du stockage

Ce risque, présent dès le début de l'activité de construction, est lié au taux d'exhalation naturel du radon par la roche dans lesquelles seraient positionnées les installations souterraines. Compte tenu de la nature argileuse de la formation du Callovo-Oxfordien, ce risque est limité. Sa maîtrise passe par une ventilation permanente des galeries souterraines qui permet l'évacuation du radon et de ses descendants dans l'atmosphère extérieure.

11.1.1.4 Risque d'exposition interne par ingestion de matières radioactives

Dans les installations de surface, ce risque pourrait être lié à la dispersion de particules radioactives provenant des emballages de transport, des colis (colis primaires, colis de stockage) ou des hottes de transfert.

Dans les installations de surface, la gestion de ce risque reposerait sur l'organisation des installations de réception et de préparation en systèmes de confinement¹⁴⁶ afin d'éviter une dispersion de radionucléides vers les zones de circulation du personnel ou dans l'environnement. De plus, ces installations seraient équipées de dispositifs de filtration sur leur circuit de ventilation, à l'instar de ce qui est pratiqué dans des installations nucléaires existantes de même type¹⁴⁷. Enfin, il est important de mentionner que des contrôles de non-contamination¹⁴⁸ des emballages de transport, des colis et des hottes seront réalisés systématiquement.

11.1.1.5 Risque de criticité

Le risque de criticité correspond à une réaction nucléaire en chaîne non contrôlée. Celle-ci est initiée par une augmentation d'activité neutronique sur des matières fissiles (uranium 235, plutonium 239 et 241).

Les colis B et C ne contiennent pas une quantité suffisante de matières fissiles (masse critique) nécessaire à ce type de réaction. Les colis de combustibles usés sont les seuls concernés par ce risque [55].

Au niveau des installations nucléaires de surface, pour les combustibles usés, il faut s'assurer de l'absence d'arrivée d'eau¹⁴⁹ dans les cellules de conditionnement pour s'affranchir du risque de criticité, à l'instar de ce qui se pratique dans des installations d'entreposage similaires existantes sur les sites de production des déchets.

Dans les installations souterraines, le transfert des colis et leur mise en stockage se fait à sec. Il n'y a pas de risque de criticité associé.

11.1.2 Évaluation dosimétrique sur le site et en limite de site

Cette première évaluation, basée sur les caractéristiques radiologiques des colis, rappelées ci-après, tient compte des dispositions envisagées (écrans de protection radiologique, contrôles de non-contamination et mesures de surveillance...).

¹⁴⁶ Le principe d'un système de confinement est de créer une différence de pression d'air entre locaux adjacents.

¹⁴⁷ Ces dispositifs de filtration sont d'autre part justifiés par la prise en compte de situations accidentelles, en particulier pour la réception et le conditionnement des combustibles usés nus dont la surface serait contaminée par les produits de corrosion déposés et activés lors du passage de l'assemblage combustibles en réacteur (cf.11.2.2.2).

¹⁴⁸ Les seuils d'acceptation pourraient être ceux de la Réglementation des Transports, à savoir une contamination surfacique labile (non fixée limitée à 4Bq/cm² en émetteurs β , γ et 0,4 Bq/cm² en émetteurs α [110]).

¹⁴⁹ La présence d'eau, qui atténue l'énergie des neutrons et ralentit leur vitesse, les rend plus réactifs vis-à-vis des matières fissiles et a pour effet d'augmenter la réactivité du système. Aussi, les procédés retenus pour le conditionnement des colis sont des procédés à sec, sans apport d'eau.

11.1.2.1 Données prises en compte

● Exposition externe

Les valeurs de débits d'équivalent de dose (DED) relatives aux colis primaires sont données pour les différents types de colis (cf. Tableau 11.1.1).

Tableau 11.1.1 Débit d'équivalent de dose au contact des colis primaires [3]

Type de colis		Nature du contenu	DED ¹⁵⁰ maximum au contact du colis primaire (Sv.h ⁻¹)
B	B1, B7.2	Déchets activés compactés	25
	B2	Déchets bitumés	2
	B3, B7.1, B7.3, B8	Déchets technologiques compactés ou cimentés	0,5
	B4	Déchets de structures cimentés	0,5
	B5	Déchets de structures compactés avec ou sans déchets technologiques	15
	B6	Déchets de structures et technologiques mis en fût	2
C	C0	Déchets vitrifiés	150
	Autres C	Déchets vitrifiés	250
CU	CU1 (UOx)	Assemblage de combustibles usés	25
	CU2 (MOx)	Assemblage de combustibles usés	15
	CU3	Combustibles usés	150

● Exposition interne

L'exposition par inhalation est liée d'une part aux gaz et aérosols radioactifs émis par certains colis B depuis leur réception dans les installations de surface jusqu'à leur mise en alvéole de stockage, et d'autre part au radon qui est un gaz émis naturellement par le milieu géologique dans les galeries des installations souterraines ainsi que par certains colis B.

Gaz radioactifs émis par les colis

Certains colis contiennent des traces de gaz radioactifs. Des dispositions ont été présentées au chapitre 4 pour réduire le relâchement de ces gaz. Cependant, ces mesures ne s'appliquent pas aux colis générant également de l'hydrogène par radiolyse (colis B2 et B5.1). Pour le colis type B5.1, le plus pénalisant en la matière, les taux de relâchement retenus (en becquerels par heure et par colis primaire) sont respectivement de 420 pour le tritium, 420 pour le carbone 14 et 7 080 pour le krypton 85 [3].

Gaz radon émis par les terrains dans les installations souterraines

Le taux d'exhalation du radon par les terrains est variable en fonction de divers éléments tels que la ventilation et la nature du revêtement des galeries. A ce stade, la valeur retenue correspond à la valeur moyenne observée en France.

11.1.2.2 Évaluation dosimétrique

L'évaluation dosimétrique [107] est faite pour chaque type de poste de travail identifié sur le site de stockage, ainsi que pour le public en limite de site.

¹⁵⁰ Pour les colis faiblement ou fortement exothermiques, les valeurs indiquées ici correspondent à un âge des colis de 5 ans pour les B1, 10 ans pour les B5 et les CU3, 20 ans pour les C0, 60 à 70 ans pour les C, 60 ans pour les CU1 (UOx) et 90 ans pour les CU2 (MOx).

● **Évaluation dosimétrique pour le personnel affecté aux installations nucléaires du stockage**

Les résultats sont présentés en distinguant les différents postes de travail dans les installations de surface et dans les installations souterraines (cf. Tableau 11.1.2).

Exposition externe

L'exposition aux rayonnements ionisants des personnes est fonction de la nature et du flux annuel des colis de déchets reçus ainsi que du processus d'exploitation. Ce dernier est défini par le mode de conduite des installations et des équipements (conduite en local, à distance, ou depuis une salle de conduite) ainsi que par la durée nécessaire pour réaliser les différentes opérations liées à l'exploitation du stockage (cf. chapitre 9).

À partir de ces données, l'évaluation dosimétrique est réalisée de la manière suivante :

- pour chaque activité liée à la production, une évaluation de la dose annuelle est faite, en tenant compte du nombre de fois où cette opération est répétée pendant l'année. La dose moyenne reçue par un opérateur est calculée à partir de l'estimation du nombre total d'opérateurs prévus pour chacune de ces opérations ;
- pour les activités non liées directement à la production (salle de conduite, surveillance des installations,...), l'évaluation dosimétrique est faite directement pour le poste considéré.

Exposition interne

L'exposition par ingestion de matières radioactives a été considérée comme négligeable en raison des mesures de prévention prises.

L'exposition par inhalation de gaz radioactifs a deux composantes :

- pour les colis B émetteurs des gaz radioactifs, l'hypothèse retenue est celle du transfert en hotte d'un colis de stockage B5.1 dans une galerie faiblement ventilée. Les expositions du personnel estimées à partir des activités volumiques et des coefficients de dose relatifs à l'inhalation pour le tritium et le carbone 14 sont négligeables (de l'ordre de 10^{-3} mSv par an) ;
- en ce qui concerne les doses liées au radon issu du milieu géologique, la valeur annuelle retenue est de 0,5 mSv pour l'ensemble des opérateurs travaillant dans les installations souterraines, en zone nucléaire comme en zone de travaux.

Résultats

Tableau 11.1.2 Estimation de la dose annuelle reçue par les opérateurs (mSv/an/personne) affectés aux installations nucléaires du stockage

Activité	Type de colis	Dose annuelle par opérateur (mSv/an/opérateur)
Installations nucléaires de surface		
Réception des colis primaires	B / C	2,1
	CU (UO _x)	4
Contrôle des colis primaires	B / C	1
	CU (UO _x)	1
Introduction des conteneurs vides	B / C	1,3
	CU (UO _x)	1
Préparation des colis de stockage	B	1,5
	C	1,5
	CU (UO _x)	1,4
Contrôle des colis de stockage	B	1
	C	0,9
	CU (UO _x)	0,8
Mise en hotte des colis de stockage et contrôle des hottes de transfert au jour	B	1,6
	C	0,9
	CU (UO _x)	1
Salle de conduite surface	/	0,5
Surveillance surface	/	2,3
Maintenance surface	/	3,7
Installations nucléaires souterraines		
Transfert et mise en alvéole des colis de stockage	B	1,2
	C	1,3
	CU (UO _x)	4
Pose des bouchons des alvéoles	C	0,6
	CU (UO _x)	0,9
Contrôle des hottes de transfert au fond	B	0,9
	C	1,1
	CU (UO _x)	0,8
Salle de conduite fond	/	0,5
Surveillance / Maintenance fond	/	2,2

Ces résultats permettent de constater que les valeurs les plus élevées, comprises entre 2 et 4 mSv/an, seraient associées à la réception des colis primaires, au transfert et à la mise en alvéole des colis de stockage et à la surveillance et à la maintenance des installations. Les valeurs associées aux autres activités seraient inférieures à 2 mSv/an.

Les doses reçues par les personnes présentes sur le site seraient donc inférieures à la contrainte que s'est fixée l'Andra (5 mSv/an), nettement en dessous de la limite réglementaire (20 mSv/an).

● Évaluation dosimétrique pour le public en limite de site

L'exposition externe n'est pas prise en considération pour le public dans cette estimation compte tenu de la distance qui le sépare des installations nucléaires.

L'exposition interne liée aux gaz radioactifs émis par certains colis B et rejetés dans l'environnement a été estimée en supposant le stockage en fin d'exploitation, c'est-à-dire avec l'ensemble de l'inventaire de déchets B considérés (cf. chapitre 3). Cette estimation préliminaire a été faite en limite du site de stockage, considérée à 500 m de la cheminée d'extraction d'air des installations souterraines. Le calcul, qui tient compte des activités radiologiques libérées par les colis et d'un facteur de transfert à l'homme intégrant les trois voies d'atteintes à l'organisme, montre que la dose annuelle pour une personne du public, de l'ordre de 1 μSv , serait négligeable.

L'exposition interne liée au gaz radon diffusé par les déblais d'argilites stockés sur la verse en surface ou lié au rejet de la ventilation des installations souterraines du stockage dépendra de multiples facteurs : taux d'exhalation du radon par les argilites, débit de ventilation dans les installations souterraines et hauteur de la cheminée de rejet, longueur et type de galeries ouvertes (galeries en travaux ou en exploitation), conditions locales atmosphériques. Comme dans le cas précédent, elle peut être considérée comme négligeable, compte tenu de la nature du milieu géologique et du retour d'expérience.

11.1.3 Conclusion

Compte tenu des mesures prises vis-à-vis du risque radiologique au niveau de la conception des installations et de leur mode d'exploitation, les doses reçues par les personnes présentes sur le site ou par une personne du public en limite de site devraient être inférieures aux contraintes annuelles que s'est fixées l'Andra en matière de radioprotection, et nettement en deçà des limites réglementaires. Il convient aussi de rappeler que ces estimations sont préliminaires et ne tiennent pas compte d'une démarche d'optimisation ultérieure.

11.2 Analyse de risque

Cette section dresse un bilan des risques identifiés dans les installations pour l'ensemble des activités du stockage (construction, exploitation, fermeture) et propose des mesures de réduction associées. Elle différencie les risques « internes » liés aux activités conduites sur le stockage et les risques « externes » liés à l'environnement du stockage (qui sont traités de manière plus générique).

Les risques examinés dans le cadre de l'étude sont ceux qui sont susceptibles d'avoir des effets sur les personnes ou l'environnement. En revanche, les conséquences opérationnelles (détérioration de l'outil de travail, baisse de production) ne sont pas abordées à ce stade.

Ce bilan [107] permet de mettre en exergue certains risques particuliers qui ont fait l'objet d'études complémentaires (cf. sections 11.3 à 11.8) compte tenu de leur spécificité ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements.

11.2.1 Méthodologie

L'analyse commence par l'identification des sources de danger associées aux activités du stockage. Elle a été réalisée avec l'appui d'experts dans les différents domaines techniques concernés (installations nucléaires, équipements de transport en puits, tunnels souterrains...) qui ont utilisé des listes-type de dangers¹⁵¹ et qui ont apporté leur expérience relative à des installations comparables.

Cette analyse qui a été structurée par composantes physiques (installations de surface, puits d'accès, installations souterraines) et par activités (construction, exploitation, fermeture) tient compte de manière systématique du respect des fonctions de sûreté en exploitation du stockage. Elle a permis d'avoir la vision la plus exhaustive possible, à ce stade des études, des risques susceptibles d'être encourus par le personnel et l'environnement.

¹⁵¹ Parmi les listes-type de dangers, la liste MADS (Méthode d'Analyse des Défaillances des Systèmes) et la liste MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques) sont le plus couramment utilisées pour une analyse de risque d'une installation industrielle.

Les risques sont caractérisés par une source de danger et des mesures de réduction de risques. Celles-ci comprennent des mesures de prévention pour empêcher ou minimiser l'apparition du risque ainsi que des mesures de protection, qui interviennent pour en annuler ou limiter les effets (cf. Figure 11.2.1). Des mesures de surveillance complètent les mesures de réduction de risques.

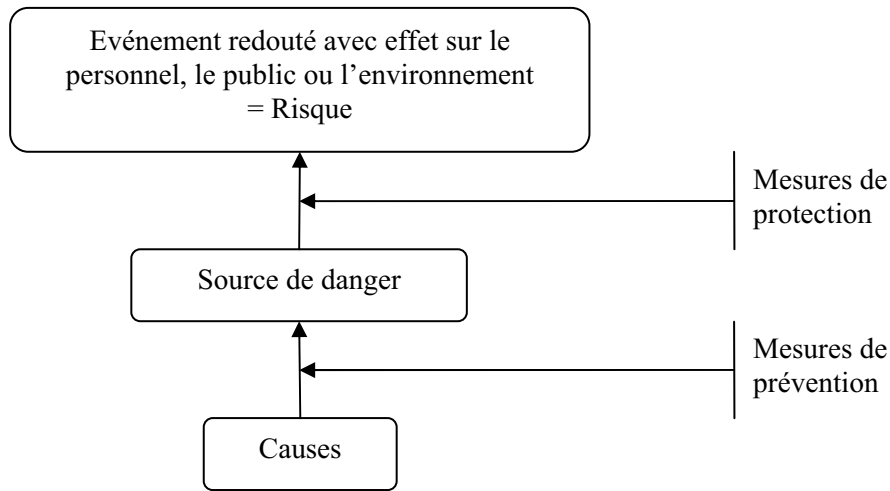


Figure 11.2.1 Caractérisation d'un risque

Cette caractérisation conduit à porter un jugement qualitatif sur le niveau de risque résiduel qui subsiste malgré les mesures de réduction de risque proposées. Cette appréciation d'experts est faite en fonction de la vraisemblance d'apparition du risque et de l'importance de ses conséquences potentielles sur le personnel, le public ou l'environnement.

11.2.2 Risques internes relatifs au processus de stockage

L'ensemble des risques internes au stockage identifiés est présenté par type de risques en distinguant successivement les risques « conventionnels » qui sont rencontrés classiquement dans toute installation industrielle et les risques de nature radiologique liés à la présence des colis de déchets nucléaires.

11.2.2.1 Risques conventionnels

● Risques recensés

Les principaux risques conventionnels à prendre en considération au cours du processus de stockage [107] sont le risque d'écrasement de personnes consécutif à une chute de charges, une chute de blocs en galeries, une chute d'objets en puits, le risque d'écrasement par un équipement (coincement par un mobile au cours d'une opération de maintenance en puits ...), le risque de heurt par un engin, le risque de collision entre engins, le risque de chute lié à des travaux en élévation (notamment en puits), le risque d'électrification et le risque d'incendie.

Les risques inhérents à l'ambiance de travail (bruit, poussières, gaz carbonique et monoxyde de carbone émis par les engins...) qui se distinguent des risques précédents par leur effet à plus ou moins long terme doivent aussi être contrôlés et maîtrisés, notamment dans les installations souterraines.

Les autres risques recensés ne revêtent pas la même importance. Parmi ceux-ci, deux risques associés à une perte temporaire de la ventilation dans les installations sont à noter. Il s'agit du risque d'explosion liée à l'émission de gaz explosifs en faible quantité par certains colis de déchets B (B2, B5) qui apparaît peu vraisemblable compte tenu des débits de ventilation prévus dans les installations qui assureront la dilution de ces gaz. Toutefois, ce risque a fait l'objet d'une étude particulière pour conforter cette analyse. Le risque associé à la présence de colis exothermiques (colis C et CU) est également à mentionner même si les températures au niveau de l'enveloppe métallique des hottes qui

les transportent ne dépasseraient pas une trentaine de degrés et ne pourraient pas entraîner de brûlures pour le personnel.

● **Mesures de réduction de risques**

La réduction des risques repose d'abord sur la prévention avec un choix d'équipements et d'engins adaptés, fiables, munis de toutes les sécurités nécessaires et bien entretenus ainsi que sur la formation du personnel, la sensibilisation aux différents types de risques encourus, le respect des procédures et des règles de circulation, le port d'équipements de protection individuelle¹⁵².

Dans les installations souterraines, la mise en place de protections physiques (notamment pour les travaux en puits), l'utilisation d'engins dont les postes de commande sont en retrait de la zone du front du chantier, l'équipement des réseaux de sécurité des chantiers (réseau d'eau incendie, réseau de communication...) au fur et à mesure de leur progression contribuent aussi à réduire les risques encourus par le personnel.

Parmi tous les risques évoqués, le risque d'incendie se distingue des autres par le fait qu'il peut avoir des conséquences collectives et nécessite des dispositions spécifiques d'évacuation pour les personnes.

Dans les installations de surface, les risques d'incendie apparaissent limités : les armoires électriques (ou électroniques) apparaissent comme la principale source d'ignition possible. Les mesures de prévention, de détection et de limitation des conséquences d'un incendie qui seraient retenues répondraient au Code du travail et suivraient les Règles Fondamentales de Sûreté RFS I.4.a [108] et RFS II.2 [109]. Il serait aussi tenu compte du retour d'expérience d'installations nucléaires présentant des fonctions analogues à celles mises en œuvre dans les installations du stockage. Les principales dispositions concernent le choix de matériaux non propagateurs d'incendie, la limitation de la charge calorifique des locaux (liée au choix de la manutention par pont roulant ou engin électrique), la sectorisation des locaux à risques d'incendie, la stabilité au feu des éléments porteurs. L'installation de systèmes de détection incendie, la maîtrise de la ventilation avec un système d'extraction des fumées et l'existence de circuits d'évacuation (avec des dégagements protégés en surpression, des sas de non-enfumage...) participent également à la sécurité des personnes.

Dans les installations souterraines, les principes adoptés sont un système de ventilation permettant l'extraction des fumées et l'existence de liaisons entre galeries adjacentes favorisant l'évacuation des personnes. Il est plus difficile de faire référence à d'autres installations existantes (tunnels de circulation, mines souterraines), car les solutions apportées sont liées à la configuration de chaque installation.

● **Synthèse**

Un bilan de l'analyse (cf. Tableau 11.2.1) est présenté par type d'activité (construction, exploitation, fermeture). La conduite de travaux associés à un retrait éventuel des colis de stockage a également été envisagée.

¹⁵² Parmi ces équipements individuels, on peut citer les chaussures de sécurité, les casques anti-bruit, les masques anti-poussières, les équipements de respiration autonomes (auto-sauveteurs) à utiliser en présence de fumées...

Tableau 11.2.1 Bilan relatif aux principaux risques conventionnels associés au processus de stockage

Activités Risques	Construction	Exploitation			Fermeture	Retrait éventuel de colis
		Installations de surface	Transfert jour / fond	Installations souterraines		
Ecrasement de personnes lié à une chute d'objet	X	X	X	X	X	X
Ecrasement de personnes lié à un équipement ou un engin	X	X	X	X	X	X
Chute de personnes liée à travaux en élévation	X		X	X	X	X
Electrisation	X	X	X	X	X	X
Incendie (surface)	X	X			X	X
Incendie (souterrain)	X		X	X	X	X
Pollution et nuisances dans l'ambiance de travail	X				X	
Explosion liée aux relâchements de gaz explosifs		X		X	X	X
Echauffement lié aux dégagements thermiques des colis						

X	Risque à prendre en compte		Risque négligeable		Sans objet		Risque faisant l'objet d'une étude complémentaire
---	----------------------------	--	--------------------	--	------------	--	---

Ce tableau permet de tirer les enseignements suivants :

- l'analyse ne montre pas de différences notables quant à la nature des risques entre les différentes activités de construction, d'exploitation et de fermeture, voire de retrait des colis¹⁵³ ;
- les principaux risques recensés qui correspondent à des risques classiques pour lesquels les mesures de prévention sont connues ne nécessitent pas d'études particulières à ce stade des études ;
- un complément d'études est en revanche justifié s'il s'agit d'un risque spécifique à l'activité du stockage, comme c'est le cas pour le risque d'explosion associé à certains colis de déchets B (cf. section 11.3) ou s'il a une influence importante sur la conception des installations du stockage et de ses équipements, comme c'est le cas pour le risque d'incendie dans les installations souterraines (cf. section 11.4).

¹⁵³ Les risques qui seraient liés à un éventuel retrait des colis ne se distingueraient pas non plus des risques identifiés car les techniques et équipements propres à ces travaux seraient très similaires à ceux utilisés durant les activités d'exploitation..

11.2.2.2 Risques radiologiques

Les risques de nature radiologique (risques d'exposition externe, risque d'exposition interne, voire risque de criticité) susceptibles d'être rencontrés au cours du processus de stockage pourraient être associés à des défauts de protection radiologique, à des interventions à proximité d'une source radioactive ainsi qu'à un incendie ou une chute affectant les colis de déchets.

Compte tenu de leur spécificité, ces risques sont analysés individuellement en mettant l'accent sur les mesures de réduction de risques envisagées.

- **Défaut de la protection radiologique assurée par les portes, trappes et hublots des cellules, les hottes de transfert, les operculaires des alvéoles C et CU, les fermetures des alvéoles B**

Ces événements pourraient résulter, par exemple, d'un jeu entre parties mobiles non conforme au dimensionnement initial. Les mesures à prendre vis-à-vis de ce risque seraient un programme de maintenance spécifique de ces parties mobiles associé à une surveillance par des détecteurs d'irradiation au niveau des cellules, des hottes de transfert et des alvéoles de stockage.

- **Défaut de protection radiologique au cours d'une intervention**

Le dysfonctionnement d'un équipement peut conduire à son immobilisation alors qu'il est utilisé pour porter ou manipuler un colis (colis primaire ou colis de stockage) et nécessiter l'intervention du personnel de maintenance pour dépanner l'équipement concerné. Cette situation entraînerait l'exposition externe du personnel si celui-ci était amené à opérer à proximité de la source irradiante.

Les mesures préventives seraient les mesures classiquement retenues dans les Installations Nucléaires de Base (INB) en exploitation, à savoir une maintenance adéquate des équipements utilisés et la redondance de certains constituants (motorisation...).

Pour les interventions sur des équipements en cellule, l'existence de moyens de secours permettant de déposer le colis et de ramener l'équipement à vide dans son local de maintenance empêcherait tout risque d'exposition pour les personnes. Dans ce dernier cas, il faut cependant s'assurer qu'il n'y a pas de dysfonctionnement du système de fermeture de la zone irradiante de la cellule¹⁵⁴ en procédant à un contrôle préalable du niveau d'irradiation dans le local de maintenance avant toute intervention.

- **Incendie dans une cellule des installations de surface**

Un incendie en cellule de fabrication des colis de stockage aurait une puissance thermique peu importante, compte tenu de la faible charge calorifique des équipements installés.

La conception des installations en tenant compte de l'expérience des INB avec une limitation des charges calorifiques présentes et la mise en place éventuelle d'écrans thermiques autour de certains équipements devraient permettre de limiter la puissance et l'extension d'un incendie afin qu'il ne puisse affecter les colis et avoir des conséquences radiologiques.

- **Incendie d'un engin de transport ou de manutention des colis de déchets**

L'incendie du véhicule porteur des emballages (contenant les colis primaires provenant des producteurs de déchets), de l'engin porteur de la hotte (contenant des colis de stockage) ou de l'engin de manutention des colis B en alvéole de stockage pourrait avoir des conséquences radiologiques qui s'ajouteraient aux conséquences directes de l'incendie (cf. section 11.4).

En surface, dans le cas du véhicule porteur des emballages, celui-ci ressort du local de réception des colis dès que l'emballage a été déposé, ce qui limite la présence du principal initiateur du risque. De plus, l'emballage de transport est conçu pour résister à un incendie de 800 °C pendant 30 minutes suivant les normes de transport [110].

¹⁵⁴ Le système usuellement retenu consiste à asservir l'ouverture du local de maintenance avec la fermeture de la cellule irradiante et, si possible, de localiser la zone de maintenance à l'écart du champ de rayonnement potentiel des sources radioactives présentes dans la cellule.

Dans les installations souterraines, l'engin porteur de hotte, comme l'engin de mise en place des colis B en alvéole de stockage, ne sont connus que de manière simplifiée à ce stade de l'étude et il n'y a pas de référence correspondante. Il a donc été nécessaire de faire des simulations en faisant des hypothèses sur les puissances thermiques en jeu et la nature des échanges au cours de l'incendie. Ces études sont développées dans les sections 11.5 (engin porteur de hotte) et 11.6 (engin de manutention des colis B).

● **Chute d'un colis primaire dans les installations nucléaires de surface**

La manutention des colis primaires pourrait être la cause de leur chute et de leur endommagement. Les conséquences envisageables seraient une ouverture d'un (des) colis primaire(s) et une dispersion de matières radioactives dans les installations, puis dans l'environnement, via les circuits d'extraction d'air. Une chute pourrait aussi entraîner la mise en suspension d'une contamination surfacique du colis qui aurait échappé aux différents contrôles (cf. 11.1.1.4).

Les mesures de prévention sont spécifiques à chaque équipement. Il s'agit de dimensionner les organes des équipements par rapport à des sollicitations supérieures à celles attendues, d'assurer une redondance de certains composants et de concevoir des dispositifs intrinsèquement sûrs en cas de dysfonctionnement (par exemple, le maintien en position fermée du grappin en cas de défaut d'alimentation électrique). La formation du personnel et la maintenance ont également une grande importance vis-à-vis de ce risque. De plus, le procédé mécanique mis en œuvre doit privilégier la manutention des colis à une faible hauteur inférieure à leur hauteur de résistance à la chute.

La mesure de protection préconisée pour s'affranchir d'un éventuel relâchement de matières radioactives serait l'installation d'une filtration sur le circuit d'extraction d'air des cellules de réception des colis primaires et de préparation des colis de stockage.

Cette mesure se justifierait en particulier pour certains colis primaires B, comme le colis de boues bitumées, qui n'est pas totalement à l'abri d'une défaillance du sertissage de son couvercle et de son ouverture en cas de choc.

Il en serait de même pour les locaux de réception d'assemblages de combustibles usés nus dont la chute lors des opérations de manutention nécessaires jusqu'à leur conditionnement pourrait entraîner une rupture de la gaine des crayons combustibles. Les principales dispositions de gestion de ce risque pourraient être similaires à celles retenues pour le déchargement à sec de ce type de combustibles en usine de retraitement (atelier T0 de Cogema à La Hague).

● **Chute d'un colis B au moment de sa mise en stockage¹⁵⁵**

L'utilisation de l'engin avec transport du colis en position basse tout au long de l'alvéole limite le risque de chute à la phase de levage et de mise en place du colis à son emplacement de stockage. Au cours de cette opération, une erreur de repérage de la position attendue du colis à stocker, ou un dysfonctionnement du système de levage de l'engin utilisé pourrait être la cause d'une chute d'une hauteur de 4 à 6 m, pour les colis placés sur le plus haut niveau des empilements.

Plusieurs dispositions sont envisagées pour limiter l'occurrence de ce risque et ses conséquences :

- la procédure de stockage, avec une mise en place d'une rangée de colis posés sur le sol, puis celle des colis de la deuxième couche et ainsi de suite, limite le risque au seul basculement latéral du colis ;
- le contrôle du cycle de mise en stockage des colis (cycle validé pas à pas par l'opérateur, contrôle visuel au moyen de caméras) et une vérification préalable de la position de stockage en adéquation avec la cartographie de l'alvéole devraient éviter toute erreur de positionnement au moment de la pose du colis ;
- le choix d'un engin conçu pour avoir une bonne stabilité (cf. section 9.3) dans toutes les positions de la charge et, sur le système de levage, des dispositions telles que des freins et capteurs de

¹⁵⁵ Les procédés envisagés pour la mise en alvéole des colis C et CU (cf. section 9.3) nécessitent une hauteur de manutention inférieure à 2 mètres. De ce fait, ces cas de chute ne sont pas traités.

sécurité, la redondance de différents constituants du système de levage, une alimentation électrique doublée, un dispositif pour affaler la charge en cas de détection d'anomalie...devraient permettre de prévenir le risque de chute. Ces différents dispositifs devraient être contrôlés régulièrement ;

- les colis de stockage assurent en cas de chute une protection des colis primaires contenus.

Afin de quantifier les déformations subies par les colis de stockage en cas de chute et examiner quelles en seraient les conséquences, une première approche a été de faire une étude de simulation pour vérifier la tenue des colis à la chute (cf. section 11.8). Il a été prévu de valider ces résultats par des essais de chute de colis de stockage B2 et B5 à échelle réelle au cours de l'année 2005.

● **Dérive incontrôlée ou chute de la cage chargée de la hotte de transfert du colis de stockage B, C ou CU dans le puits¹⁵⁶**

L'expérience acquise dans les mines sur ce type de transport et l'ensemble des mesures de prévention et de contrôles sont tels qu'une chute de la cage est un événement dont la vraisemblance est extrêmement faible¹⁵⁷.

Les mesures de prévention de ce risque concernent aussi bien la conception de l'équipement (dispositifs indépendants de freinage sur la poulie motrice, faisceau de câbles de suspension de la cage indépendants¹⁵⁸,...) que les procédures de maintenance, de contrôle et de fonctionnement. Il pourrait être envisagé d'ajouter à ces mesures un système anti-chute de la cage pour avoir un système de sécurité supplémentaire indépendant du système de contrôle-commande de la cage. Le principe de ce système serait d'utiliser des câbles suspendus dans le puits comme câbles de freinage sur lesquels la cage pourrait se bloquer en cas de survitesse. Pour limiter les contraintes subies par ces câbles au moment de leur sollicitation, ceux-ci seraient reliés à des amortisseurs d'énergie qui pourraient dissiper une grande partie de l'énergie cinétique liée au mouvement de la cage.

Les mesures qui limiteraient les conséquences mécaniques d'une dérive ou d'une chute de la cage en puits seraient de deux types :

- un système de freinage de fin de course, d'un type similaire à ce qui est installé réglementairement en mine quelques mètres en dessous de la recette fond, permettrait d'arrêter une cage dépassant son niveau d'arrêt, si sa vitesse ne dépassait pas 10 m/s environ. Il répond au cas d'une dérive de la cage liée à un dysfonctionnement du freinage au moment de son arrivée à la recette ;
- pour des vitesses supérieures à 10 m/s, un amortisseur de chute constitué par un matériau de type « nid d'abeille » et placé en partie inférieure du puits aurait l'avantage d'être un système passif capable d'absorber des niveaux d'énergie importants. Des tests en laboratoire ont permis de caractériser le comportement de ce matériau pour des impacts à vitesse élevée (cf. Figure 11.2.2).

¹⁵⁶ D'autres cas de chute ont été envisagés avec la chute directe de l'engin porteur de hotte dans le puits (la cage n'étant pas en position) ou la chute de la hotte à travers le plancher de la cage (suite à un choc ou à une faiblesse de sa structure). L'identification de ces deux cas, qui apparaissent encore moins vraisemblables que le précédent [111], servent surtout à justifier le renforcement de mesures de prévention, sur les accès à la cage, et sur le contrôle régulier de l'état du puits et de la cage.

¹⁵⁷ En Allemagne, une étude faite pour le projet de stockage de déchets radioactifs de Gorleben [111] estime, pour une installation comparable, que la probabilité d'une chute de cage en puits est de 5.10^{-7} /an (pour 5 000 heures de fonctionnement annuel).

¹⁵⁸ L'étude actuelle prévoit un système avec 10 câbles de suspension indépendants permettant le transport de charges d'une centaine de tonnes. Il y a arrêt en cas de rupture d'un seul câble, ce qui rend la rupture en cascade de l'ensemble multi-câbles improbable.

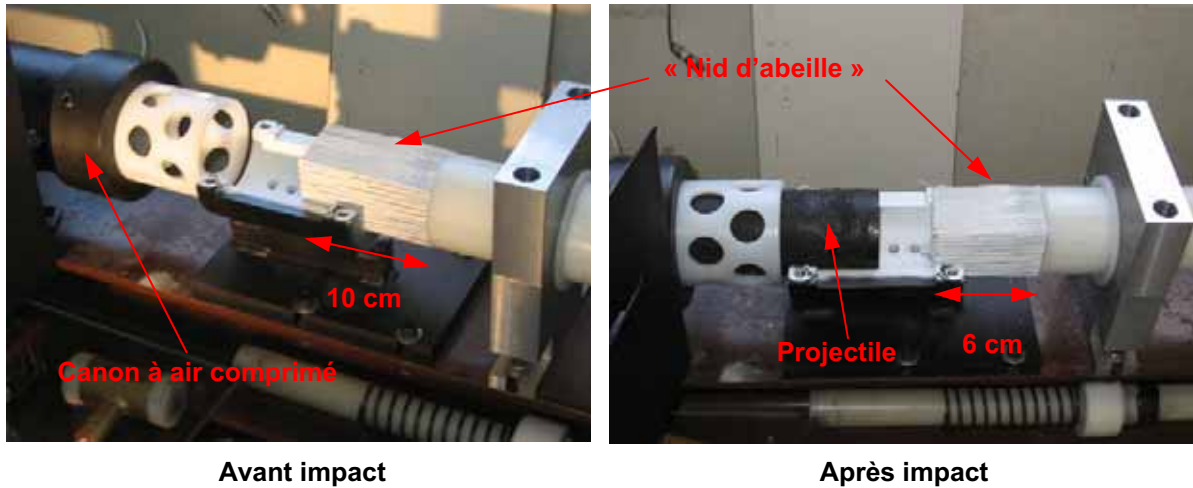


Figure 11.2.2 Test d'écrasement d'un matériau « nid d'abeille » (vitesse d'impact de 200 km/h)

Ces différentes mesures sont illustrées par la Figure 11.2.3.

La quantification de l'effet de l'amortisseur d'énergie sur les colis transportés dans la cage a nécessité des études de simulation développées dans la section 11.7. Elles permettent de constater qu'au moment de l'impact, l'amortisseur et la cage absorberaient la majeure partie de l'énergie. La structure métallique de la hotte de transfert serait déformée, mais ne montrerait pas d'ouverture. Les colis primaires devraient rester intègres, même si dans le cas des colis B, l'enveloppe béton de leur colis de stockage serait endommagée.

Cependant, compte tenu des incertitudes liées au déroulement de la chute de la cage dans le puits qui ne seraient pas couvertes par les études de simulation évoquées précédemment, des scénarios de relâchement de matières radioactives ont été également envisagés dans la section 11.7 afin d'obtenir un ordre de grandeur des conséquences radiologiques de la chute et de s'assurer qu'il existe des moyens techniques permettant, le cas échéant, d'en limiter l'impact à un niveau acceptable pour l'environnement.

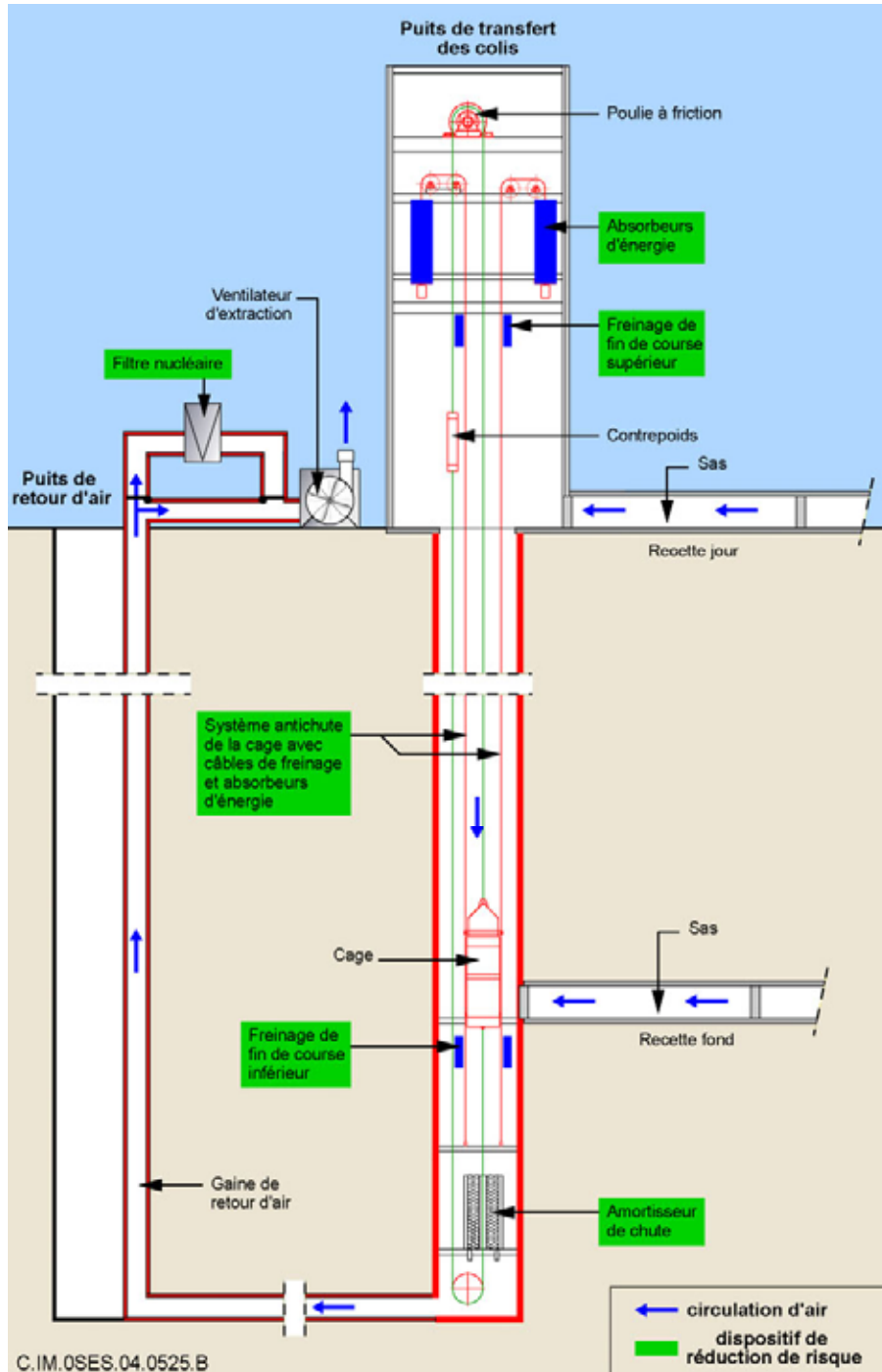


Figure 11.2.3 Schéma des dispositifs de réduction de risque envisagés vis-à-vis du transfert de colis en puits

- **Risque de criticité associé à la chute de la cage chargée de la hotte de transfert d'un colis de combustibles usés dans le puits**

Un scénario de chute de la cage chargée de la hotte avec un colis de combustibles usés, qui associerait un endommagement grave de ce colis (modification de sa géométrie interne, ruptures et rapprochements des faisceaux de combustibles...) et une arrivée d'eau, pourrait conduire à un risque de criticité.

Compte tenu des mesures envisagées vis-à-vis du risque de chute en puits, un tel niveau d'endommagement du colis n'apparaît pas vraisemblable. Cependant, une précaution supplémentaire

serait de s'assurer de l'absence d'eau (ou d'un autre fluide hydrogéné) dans le puits pour s'affranchir totalement de ce risque. Cela consisterait à interdire de placer des canalisations dans le puits de descente des colis tout en disposant en plus d'un système d'évacuation de l'eau en fond de puits.

Les autres situations dangereuses envisagées [55] n'apparaissent pas pouvoir induire un risque de criticité.

● **Synthèse**

Un bilan de l'analyse (cf. Tableau 11.2.2) est présenté par type d'activité (construction, exploitation, fermeture). La conduite de travaux associés à un retrait éventuel des colis de stockage a également été envisagée.

Tableau 11.2.2 Bilan relatif aux risques radiologiques liés au stockage

Risques \ Activités	Exploitation			Fermeture	Retrait éventuel des colis
	Installations de surface	Transfert jour / fond	Installations souterraines		
Défaut de protection radiologique lié à un équipement	X		X	X	X
Défaut de protection radiologique au cours d'une intervention	X		X	X	X
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à un incendie dans une cellule des installations de surface	X				
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à une chute de colis primaire dans les installations de surface	X (B et CU nus)				
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à un incendie d'un engin de transport ou de manutention	X		X		X
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à une chute de colis B au moment de sa mise en stockage ou de son retrait			X		X
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis / criticité ¹⁵⁹ liés à une dérive incontrôlée ou à une chute de cage en puits lors d'un transport de hotte		X			

X Risque à prendre en compte
 Risque négligeable
 Sans objet
 Risque faisant l'objet d'une étude complémentaire

¹⁵⁹ Le risque de criticité ne concerne que les combustibles usés.

Ce tableau permet de tirer les enseignements suivants :

- l'analyse ne montre pas de différences notables quant à la nature des risques entre l'activité de mise en stockage et celle de retrait des colis. Les opérations liées à un éventuel retrait des colis seraient des opérations inverses à celles réalisées en phase de mise en stockage ;
- l'activité de fermeture ne présente pas de risques liés à la manutention et au transfert des colis. En revanche, une attention particulière sera nécessaire vis-à-vis d'éventuels défauts de protection radiologique au cours des opérations conduites sur les têtes d'alvéoles de stockage ;
- l'analyse recense des risques classiques tels que les défauts de protection radiologique pour lesquels les mesures de prévention et de contrôle sont connues et ne nécessitent pas d'études particulières à ce stade des études ;
- on peut considérer également que les risques de chute de colis et d'incendie dans les installations de surface ne justifient pas d'études complémentaires à ce stade de l'étude compte tenu du retour d'expérience des installations nucléaires de surface similaires existantes ;
- les risques radiologiques associés au transfert et à la mise en place des colis en alvéole de stockage demandent en revanche des compléments d'étude. Les risques induits par des incendies d'engin nécessitent de prendre en compte leurs caractéristiques et le fait que l'incendie se développerait dans un milieu semi confiné. De même, les scénarios de chute de colis font référence à des hauteurs de chute qui diffèrent des hauteurs usuelles de manutention dans les installations de surface, en particulier au cours du transfert de la hotte en puits. Ces différents risques seront abordés respectivement dans les sections 11.5 et 11.6 pour les risques d'incendie, et les sections 11.7 et 11.8 pour les risques de chute.

11.2.3 Risques liés à l'environnement externe du stockage

11.2.3.1 Séisme

Le secteur d'étude est une zone faiblement sismique. Les installations de surface d'un éventuel stockage devraient être dimensionnées selon les règles parasismiques en vigueur. De plus, des mesures devraient être prises pour prévenir toute perte d'une fonction de sûreté qui serait susceptible d'avoir un impact radiologique pour le personnel d'exploitation et les populations.

Les mesures consistent à dimensionner au Séisme Majoré de Sécurité [112] les bâtiments (stabilité d'ensemble des bâtiments) afin de protéger les sources à l'intérieur de ces bâtiments, et les équipements qui, directement ou indirectement, pourraient être à l'origine de dissémination radioactive.

Les ouvrages souterrains résistent mieux aux sollicitations sismiques que les installations de surface du fait de leur atténuation avec la profondeur. Il a été montré que le séisme [36] n'aurait pas d'effet significatif en profondeur.

11.2.3.2 Risques météorologiques

Les principaux risques météorologiques ne concernent que les installations de surface et n'ont pas d'impact sur les activités souterraines. Il s'agit principalement des précipitations (pluie, neige), des températures extrêmes, de la foudre et du vent.

11.2.3.3 Chute d'avion

Indépendamment des conséquences physiques directes, une chute d'avion sur les installations de surface pourrait entraîner la perte des fonctions de sûreté et induire une exposition radiologique du personnel et un rejet dans l'environnement.

Ce risque pourrait être abordé selon les principes définis par la RFS I.1.a [113]. Celle-ci recommande une évaluation de la probabilité de chute sur les « cibles » des installations dont la perte des fonctions pourrait avoir des conséquences importantes pour la sûreté. Cette évaluation est faite selon l'emplacement du site pour différents types d'activité aérienne : aviation générale, aviation

commerciale, aviation militaire. L'objectif est que la probabilité d'une chute d'avion conduise à des rejets inacceptables soit inférieure à 10^{-7} par an. Au-dessus de cette valeur, le risque de chute doit être intégré dans le dimensionnement des installations incriminées.

Dans un tel cas, les mesures mises en œuvre pour protéger les installations, notamment celles contenant les sources radioactives, consisteraient à dimensionner les ouvrages en béton pour qu'ils résistent à une chute d'avion et à baliser les obstacles les plus élevés (superstructures des puits).

11.2.3.4 Risques liés à la perte en énergie et utilités

Même si cet événement est peu probable (il pourrait résulter par exemple de conditions météorologiques extrêmes) et s'il ne met pas en danger immédiat le personnel présent, il pourrait entraîner des difficultés du fait du nombre important de systèmes qui seraient arrêtés : ventilation, éclairage, pompage, cage de transfert. Les mesures de prévention consistent en la redondance des sources d'énergie et des alimentations de secours (générateurs, batteries,...) pour les systèmes essentiels.

11.2.4 Synthèse

L'analyse de sûreté opérationnelle conduite repose sur une analyse systématique de risques qui a bénéficié de l'appui d'experts dans les différents domaines techniques concernés.

L'activité de construction des différentes installations du stockage ne diffère pas de la construction d'autres installations industrielles de surface et ouvrages souterrains (mines, tunnels...). De ce fait, les risques de cette activité sont des risques conventionnels (écrasement, chute...) recensés dans tous les travaux de construction de ce type d'installations. Ils ne justifient pas d'études complémentaires à ce stade, mais seront à prendre en considération au niveau de la conception détaillée des ouvrages et des équipements.

L'activité nucléaire dans les installations de surface du stockage, qui comprend la réception, la préparation et l'entreposage de colis de déchets, est très comparable aux activités pratiquées dans les installations nucléaires françaises d'où proviennent ces colis. De ce fait, l'analyse n'a pas nécessité d'études spécifiques propres aux installations du stockage.

L'activité nucléaire dans les installations souterraines du stockage, qui comprend le transfert des hottes (contenant les colis de stockage) dans le puits et en galerie, l'introduction et la mise en place des colis de stockage dans leurs alvéoles, est menée conjointement avec des travaux de réalisation de galeries et d'alvéoles. Ceci n'est pas couramment rencontré, même si des stockages souterrains existent de par le monde¹⁶⁰ et il est proposé dans la conception de garantir leur indépendance par une séparation des circuits des engins et des systèmes de ventilation.

L'activité de fermeture du stockage n'apporte pas d'éléments supplémentaires par rapport aux autres activités. La fermeture des installations de surface n'a rien de particulier par rapport à un chantier de démantèlement classique. Les travaux de fermeture des installations souterraines, qui se traduisent par des travaux de remblayage et la réalisation d'ouvrages de scellements placés en galerie ou en puits, seraient comparables, au niveau de l'organisation des chantiers et des types d'engins utilisés, aux activités de construction.

L'analyse a mis en exergue les risques qui nécessitent une attention particulière compte tenu de leurs spécificités ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements.

Ces risques sont le risque d'explosion lié à l'émission de gaz par certains colis de déchets (cf. section 11.3), le risque d'incendie dans les installations souterraines (cf. section 11.4) avec une focalisation sur les scénarios qui impliqueraient des colis de stockage (cf. sections 11.5 et 11.6) et les risques

¹⁶⁰ Parmi ces stockages, on peut citer celui du WIPP (New Mexico, USA), où des colis de déchets transuraniens (comparables à certains colis B) sont stockés dans des installations souterraines auxquelles on accède par des puits de 650 m de profondeur enca, à ce stade, d'éléments de faible et moyenne activité.

propres au transfert de colis de matières radioactives avec le scénario de chute en puits (cf. section 11.7) et de chute en alvéole de stockage de déchets B (cf. section 11.8).

Cette analyse correspond à la perception actuelle des principaux risques identifiés à ce stade de connaissance des installations. Elle peut être amenée à évoluer avec l'approfondissement des études de définition des installations.

11.3 Étude du risque lié à l'émission de gaz explosifs par des colis de déchets B

Une majorité des colis de déchets B (principalement B2 et B5) émet des gaz, depuis leur arrivée dans les installations de surface jusqu'à leur stockage en alvéole souterraine. Ces gaz ont pour origine un phénomène de radiolyse qui est lié à l'effet des rayonnements ionisants (β , γ) émis par les matières radioactives sur les produits hydrogénés présents dans les colis de stockage (matières organiques, eau de la matrice de conditionnement).

Ces gaz de radiolyse sont majoritairement l'hydrogène (plus de 90 % du dégagement gazeux) et, à un moindre degré, le méthane¹⁶¹. L'émission de ces gaz peut être à l'origine d'une explosion, si leurs concentrations dépassent leur limite inférieure d'explosivité¹⁶².

L'objet de cette section est de vérifier que l'émission de ces gaz par des colis de déchets B n'est pas susceptible d'entraîner un risque d'explosion [107].

11.3.1 Caractéristiques des colis de déchets

Les colis de déchets concernés par le relâchement de gaz explosifs sont principalement les colis de type B2 et de type B5.1, qui contiennent des matières organiques.

Tableau 11.3.1 Taux d'émission de gaz explosifs libérés par certains colis de déchets B

Colis primaire	Nature et contenu du colis primaire	Taux d'émission de gaz explosifs (H ₂ , CH ₄) (l/fût/an)
B2.1 B2.2	Fût métallique avec boues bitumées	- 10 litres/fût/an (valeur moyenne) - 57 litres/fût/an (valeur maximale correspondant à une minorité de fûts)
B5.1	Conteneur avec coques et embouts, et déchets technologiques (y compris organiques)	- 10 litres/fût/an (valeur moyenne) - 500 litres/fût/an (valeur maximale correspondant à une minorité de fûts)

Les valeurs moyennes d'émission de gaz par les colis ont été retenues pour les simulations dans les installations de surface et en alvéole de stockage, car elles correspondent à plusieurs centaines ou plusieurs milliers de colis ; en revanche, les valeurs maximales ont été utilisées lorsque les simulations sont relatives à la phase de transfert en galerie de la hotte chargée du colis de stockage.

La concentration des gaz dans un local donné a été estimée en fonction des caractéristiques de sa ventilation. Le taux de renouvellement d'air par heure est pris égal à 2 dans les locaux des installations nucléaires de surface. Pour la ventilation des alvéoles de stockage des colis B, les données retenues sont un débit d'air de 3 m³/s, ce qui correspond, pour une alvéole de 250 m de longueur, pleine de colis, à un taux de renouvellement d'air par heure égal à 5.

¹⁶¹ Le phénomène de radiolyse est aussi à l'origine de la libération en très faible quantité de gaz carbonique et de monoxyde de carbone. Ces gaz sont dilués par la ventilation des installations comme ceux produits par les engins à moteur thermique.

¹⁶² La Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) est la concentration minimale en gaz à partir de laquelle il y a risque d'explosion en présence d'une source d'ignition. La LIE est de 4 % pour l'hydrogène et de 5,3 % pour le méthane.

Enfin, il a été fait l'hypothèse que l'hydrogène émis par les colis de stockage se diluait de manière homogène dans le volume libre situé au-dessus des colis de stockage¹⁶³ et que la ventilation restait en service jusqu'au moment du scellement de l'alvéole.

Les estimations sont faites avec l'hypothèse pénalisante de taux de dégazage constants sur la durée de l'activité d'exploitation et de fermeture du stockage.

11.3.2 Analyse en phase d'exploitation

Cette analyse est présentée en fonction de la logique du cycle suivi par les colis : entreposage des colis primaires, entreposage des colis de stockage, transfert des colis de stockage en hotte, mise en place des colis de stockage dans les alvéoles de stockage.

11.3.2.1 Entreposages de surface (colis primaires et de stockage)

Une simulation, faite sur la base des hypothèses présentées précédemment montre que le taux d'hydrogène dans l'atmosphère des locaux est négligeable en conditions normales de ventilation (avec des taux variant de 10^{-6} à 10^{-7} dans les différents locaux de surface), et que le délai pour atteindre la limite d'explosivité de $4 \cdot 10^{-2}$ (4 %) suite à un arrêt de ventilation est de plusieurs dizaines d'années. Le risque d'explosion n'existe donc pas dans ces locaux.

11.3.2.2 Transfert des colis de stockage en hotte

L'émission d'hydrogène se produit également dans la hotte pendant le transfert des colis entre les installations de surface et l'alvéole de stockage. L'existence des jeux de construction des portes de la hotte et éventuellement la présence d'un évent permettront de diluer l'hydrogène émis par les colis dans l'atmosphère du lieu de passage de la hotte et il n'y aura pas de risque d'explosion compte tenu du faible débit d'hydrogène émis en regard des flux de ventilation circulant dans les différentes installations.

11.3.2.3 Alvéoles de stockage

La simulation a été faite en supposant un arrêt de ventilation dans une alvéole de stockage de 250 m de longueur remplie de colis B5.1. Il a été considéré que l'hydrogène se concentrait préférentiellement dans les 15 cm supérieurs de l'alvéole de stockage, au-dessus des colis de stockage.

Dans ces conditions, la durée d'atteinte de la limite d'explosivité de 4 % est de l'ordre d'une trentaine de jours. Il n'y a donc pas de risque d'explosion même avec un arrêt temporaire de la ventilation.

11.3.3 Analyse en phase de fermeture du stockage

Vis-à-vis du risque d'explosion, cette phase peut être subdivisée de la manière suivante.

11.3.3.1 Phase de scellement des alvéoles de stockage

La réalisation d'un scellement commencerait par la mise en place d'un écran de radioprotection constitué de blocs de béton équipés de conduits permettant le maintien de la ventilation en alvéole (cf. 5.1.6). Cette étape se poursuit par la réalisation d'un massif d'appui en béton qui remplit la tête d'alvéole et isole ainsi les colis de stockage par rapport à la galerie d'accès. Dans ces conditions, le relâchement d'hydrogène vers la galerie d'accès serait très faible et ne pourrait être source d'explosion, d'autant plus que cette galerie sera ventilée pendant toute la durée de la mise en place du noyau d'argile gonflante du scellement.

¹⁶³ L'hydrogène, plus léger que l'air, aura tendance à migrer au-dessus des colis vers le haut du local.

11.3.3.2 Période après scellement des alvéoles de stockage

Les travaux de remblayage eux-mêmes pourraient se dérouler en deux étapes – le remblayage des infrastructures de la zone de stockage de déchets B, puis plus tardivement le remblayage du reste des infrastructures avant la fermeture complète du stockage.

Ces travaux de remblayage sont isolés des alvéoles de stockage par les scellements et ne peuvent pas induire de risques d'explosion.

Cependant, si un retour dans une alvéole après mise en place du scellement était envisagé, une telle opération ne pourrait se faire qu'après un renouvellement préalable de l'atmosphère de l'alvéole de stockage de manière à évacuer l'hydrogène présent (cf. chapitre 10). Ceci nécessiterait de prendre des dispositions spéciales pour ne pas avoir de risques d'ignition au moment de la remise en place du système de ventilation, du type de celles pratiquées en mines de charbon grisouteuses.

11.3.4 Conclusion

Les risques liés à l'émission de gaz explosifs (H_2 pour l'essentiel) par certains colis de déchets B sont maîtrisés en phase d'exploitation par la ventilation des différentes installations du stockage, qui assure leur dilution. Une interruption de cette ventilation ne présente pas de réels dangers car le délai disponible pour intervenir est important.

Les étapes de fermeture du stockage ne présentent pas de risques d'explosion, sauf en cas de retour dans une alvéole après mise en place du scellement. Dans ce cas, il sera nécessaire de rétablir une ventilation pour extraire les gaz accumulés dans l'alvéole de stockage en prenant les dispositions de sécurité nécessaires au moment de son installation.

11.4 Étude du risque d'incendie dans les installations souterraines du stockage

L'incendie reste l'un des événements les plus redoutés en milieu souterrain parce qu'il se développe dans un milieu semi confiné et que les fumées et les gaz toxiques associés pourraient s'étendre à travers les galeries dans les installations, gêner l'évacuation des personnes et mettre en danger un nombre important de personnes.

Le retour d'expérience des incendies en ouvrages souterrains montre que, le potentiel calorifique des galeries proprement dites étant très faible, seuls les engins et équipements peuvent être à l'origine d'un incendie important. Les trois causes principales des incendies d'engins sont, d'après une étude sur les mines suédoises [115], les courts-circuits électriques (de l'ordre de 50 %), une fuite d'huile sur une surface chaude (de l'ordre de 25 %) et une surchauffe de moteur (pour 10 % des cas environ). En revanche, le risque de collision induisant un feu est réduit compte tenu des faibles vitesses de déplacement et de la faible fréquence de croisements entre engins.

Les mesures essentielles de prévention de l'incendie dans les installations souterraines sont :

- l'utilisation préférentielle de matériaux ininflammables, non-propagateurs d'incendie et non-émetteurs de fumées toxiques ;
- un contrôle des produits inflammables présents (justification du choix et de l'utilisation du produit, quantité maximale autorisée, conditions de transport et procédures d'utilisation, ...) ;
- la limitation de la quantité du carburant pour les engins à moteur thermique, la protection des parties sensibles des engins, ainsi que le choix éventuel d'engins électriques à plus faible charge calorifique, si le type d'activité le permet ;
- la mise en place de procédures de contrôle, de maintenance et d'utilisation des engins et équipements (permis de conduite des engins, permis de feu, ...), ainsi qu'une formation du personnel pour réagir efficacement en cas d'anomalie.

Des équipements de détection d'incendie (avec des détecteurs de fumées, de flammes ou de température) sont également utiles pour permettre une intervention rapide et une maîtrise de l'incendie

avant atteinte de toute sa puissance. Ces systèmes sont installés préférentiellement au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Les mesures de protection contre l'incendie sont d'abord les moyens de première intervention mis à la disposition du personnel, avec des extincteurs et un réseau d'eau sous pression installés jusqu'à proximité du chantier. Des systèmes d'extinction automatique fixes, installés dans des zones à risque (stockage de carburants ou d'huiles), et des systèmes embarqués sur engin pourraient être aussi des moyens efficaces à utiliser.

Indépendamment de ces actions sur l'incendie, les installations souterraines devraient être équipées d'un système d'extraction des fumées permettant l'évacuation du personnel dans des conditions de température, de visibilité et de toxicité acceptables. L'installation de systèmes d'alerte¹⁶⁴, d'alarme et d'un poste de contrôle (PC) centralisé apte à suivre la situation et diriger les opérations, contribuerait aussi à organiser cette évacuation dans les meilleures conditions de sécurité possibles.

Cette section fait l'hypothèse du développement d'un incendie malgré les mesures de prévention présentées précédemment. Elle a pour but d'étudier différents scénarios d'incendie représentatifs, d'évaluer leurs conséquences (élévation de température, émission de fumées, émission de gaz toxiques) et de s'assurer que les conditions d'évacuation du personnel sont satisfaisantes. Elle ne traite pas des incendies susceptibles d'avoir des conséquences radiologiques, qui nécessitent des développements particuliers et sont abordés dans les sections 11.5 et 11.6.

11.4.1 Simulations d'incendie

Des études de simulation [107] ont été menées afin d'appréhender les conséquences potentielles de différents scénarios d'incendie envisagés en fonction de leurs caractéristiques.

11.4.1.1 Caractérisation des scénarios d'incendie

Les engins utilisés pour la réalisation des ouvrages (engins de creusement, de boulonnage, de transport,...) ou les activités d'exploitation (engins de transport des hottes,...) ainsi que quelques équipements particuliers (convoyeurs à bande pour le transport des déblais,...) peuvent être à l'origine d'un incendie à potentiel calorifique élevé¹⁶⁵. Ce type d'incendie se caractérise par sa puissance thermique, la quantité de toxiques et le débit de fumées produits.

La détermination de la puissance thermique s'appuie sur la définition d'un scénario réaliste. Dans le cas d'un engin, l'événement initiateur du scénario retenu est le plus souvent une fuite de liquide combustible associée à un point chaud (étincelle, ...). Le taux de fuite du liquide pris en compte détermine la puissance initiale du feu. La durée de l'incendie dépend du potentiel calorifique de l'engin : les quantités de combustibles ou d'huiles apportent une grande part de ce potentiel qui est immédiatement mobilisable en cas de feu ; les pneumatiques contribuent à en augmenter la durée et la quantité de fumées produites. Il est aussi fait l'hypothèse que le comburant (oxygène de l'air) est en quantité suffisante et qu'il n'y a pas extinction par étouffement du foyer.

La synthèse des résultats relatifs à l'ensemble des engins étudiés montre que deux grandes catégories de feux d'engins se distinguent. Les engins diesel ou diesel-électrique (tombereau, engin de chargement, engin de creusement, engin de boulonnage/foration,...) correspondent à des feux de puissance thermique maximale proche de 25 MW tandis que les engins de transport électriques ont une puissance thermique maximale proche de 15 MW.

Pour s'affranchir des difficultés liées à la modélisation des courbes présentant des phénomènes transitoires, les simulations d'incendie ont utilisé des courbes standardisées définies par le CETu (Centre d'Etudes des Tunnels), qui sont enveloppes des précédentes en termes de puissance et de

¹⁶⁴ Une mesure intéressante serait la mise à disposition du personnel d'un moyen de phonie individuel relié à un réseau interne et au PC, qui serait utilisé en temps normal pour l'organisation du travail et qui, en cas d'incendie, serait le meilleur moyen d'alerte en temps réel.

¹⁶⁵ Un autre type d'incendie à risque élevé serait celui d'un stockage de produits inflammables, mais ce cas n'est pas pris en compte à ce stade de l'étude, d'une part parce que sa localisation et son dimensionnement ne sont pas connues, et d'autre part, parce que ce type d'installation peut faire l'objet plus facilement de mesures d'extinction spécifiques installées de manière fixe.

durée. Ces courbes, issues de l'expérience des feux en tunnels, correspondent à des incendies de véhicules routiers avec des puissances totales respectives¹⁶⁶ de 30 MW et 15 MW. Il est aussi associé à chaque type d'incendie des courbes d'émission de monoxyde de carbone et de production de fumées.

La Figure 11.4.1, qui représente l'évolution de la puissance thermique d'un feu de 30 MW en fonction du temps, est un exemple de ces courbes standardisées qui ont toutes le même profil avec une rampe de montée, un palier et une rampe de descente.

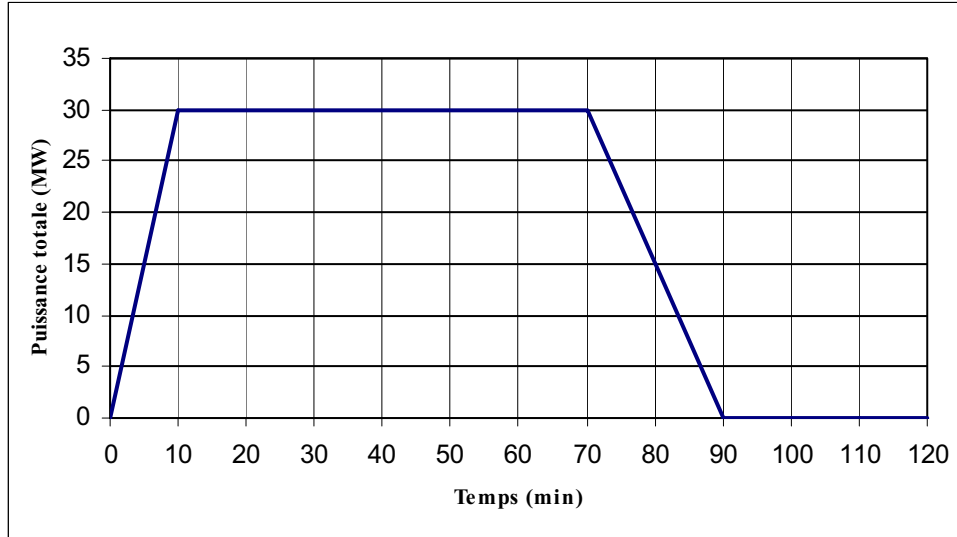


Figure 11.4.1 Puissance thermique totale standardisée pour un feu 30 MW

11.4.1.2 Mode de développement des incendies

En milieu souterrain, les incendies se développent en émettant des fumées qui vont envahir tout le volume de la galerie (incendie avec « déstratification des fumées ») ou qui vont se localiser préférentiellement en partie supérieure de la galerie (incendie avec « stratification des fumées ») en fonction des conditions de ventilation rencontrées.

● Incendies avec déstratification des fumées

Les incendies avec déstratification des fumées se traduisent par un envahissement progressif des galeries par des fumées qui opacifient l'atmosphère et peuvent rendre l'évacuation des personnes plus difficile. Ce type d'incendie, qui se produit lorsque les vitesses d'air en galerie sont supérieures à une vitesse de l'ordre de 1 m/s, se caractérise par une homogénéité du mélange air/fumées dans la section transversale de la galerie à une distance donnée par rapport au feu.

Dans le cas du stockage, les incendies dans les galeries d'accès aux alvéoles de déchets C et de combustibles usés, ventilées par une arrivée d'air frais en pleine section et avec une évacuation des fumées par une trappe de désenfumage en limite d'unité d'exploitation, seraient de ce type.

Pour ce type d'incendie (cf. Figure 11.4.2), l'évacuation se fait préférentiellement en remontant vers la galerie de liaison alimentée en air frais. Dans le cas contraire, les personnes en aval de l'incendie peuvent rejoindre la première recoupe pour accéder à la galerie d'accès contiguë alimentée en air frais (avec une distance de 200 m au maximum à parcourir du fait de la disposition des recoupes), puis la galerie de liaison.

¹⁶⁶ De manière générale pour ce type d'incendie, la puissance totale se dissipe par convection pour deux tiers, le dernier tiers étant dissipé par rayonnement.

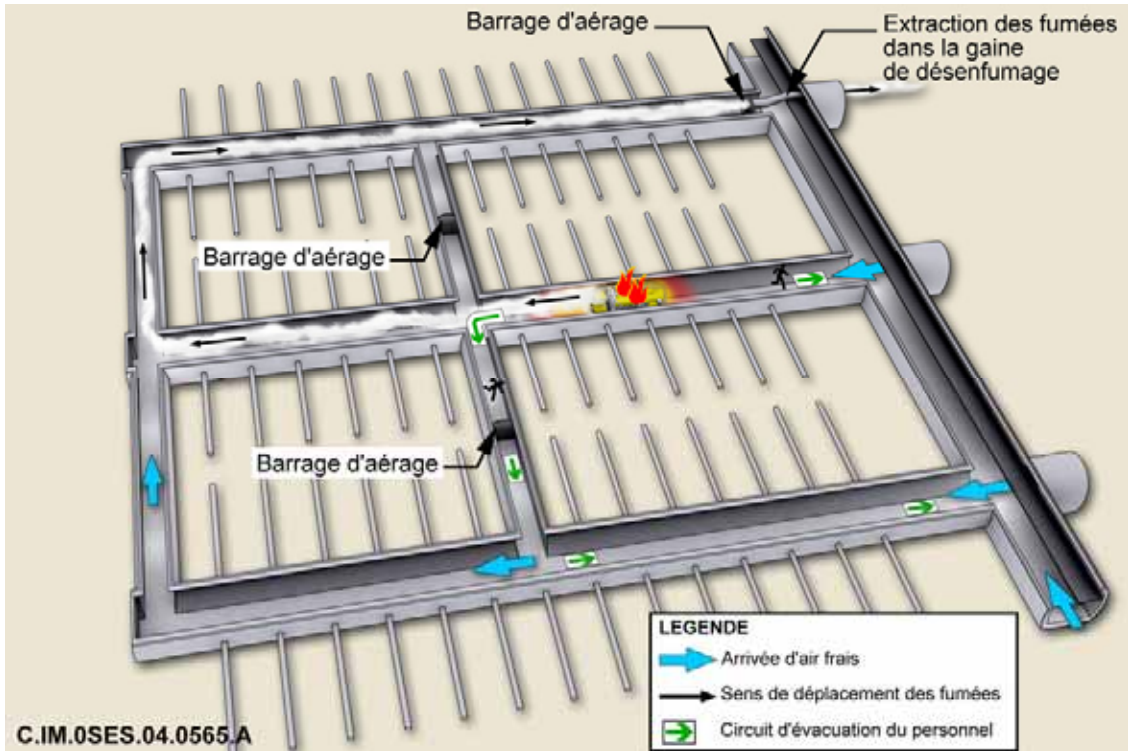


Figure 11.4.2 Circulation des fumées et évacuation dans le cas d'un incendie dans une unité C (ou CU) en exploitation

● Incendies avec stratification des fumées

Les incendies avec stratification des fumées conduisent à une localisation préférentielle des fumées en partie haute des galeries (cf. Figure 11.4.3). Ce sont alors les conditions de température associées au rayonnement de ces fumées qui constituent le principal risque pour les personnes. Ce type d'incendie se produit lorsqu'on est en présence de vitesses d'air en galerie faibles (inférieures à 1 m/s environ), avec des fumées qui se propagent de part et d'autre du foyer.

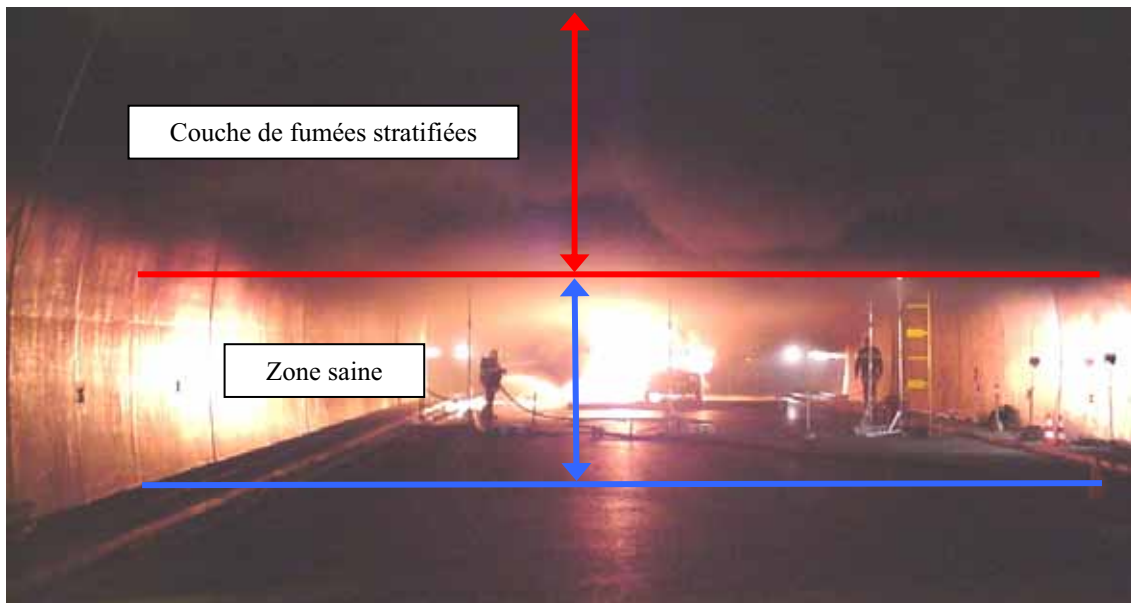


Figure 11.4.3 Cas d'incendie avec fumées stratifiées

Dans un stockage, les incendies dans les galeries de liaison, avec extraction des fumées par des trappes disposées à intervalles réguliers, seraient de ce type.

Selon leur position vis-à-vis de l'incendie, les personnes peuvent évacuer en amont ou en aval du feu par la première recoupe rencontrée pour rejoindre la galerie de liaison contiguë alimentée en air frais. La distance maximale pour atteindre ces recoupes varie de 100 m dans les galeries de liaison secondaires, à l'intérieur des zones de stockage (cf. Figure 11.4.4) à 400 m dans les galeries de liaison principales.

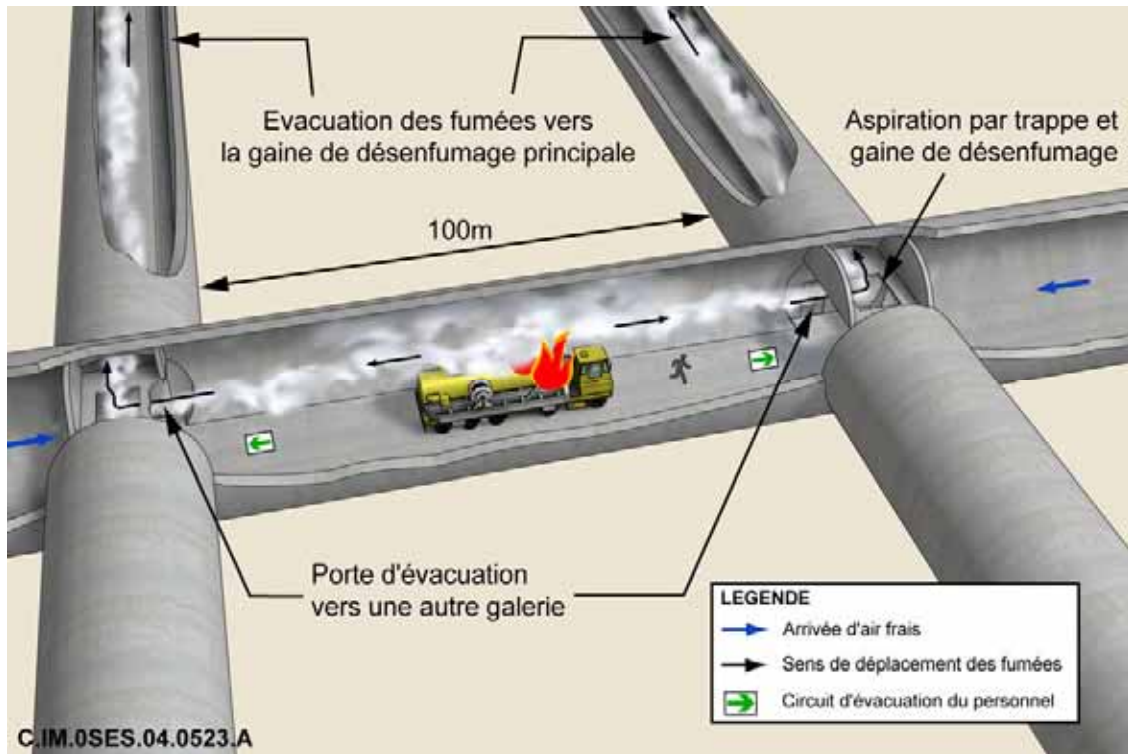


Figure 11.4.4 Cas d'un incendie en galerie de liaison : évacuation de part et d'autre de l'incendie

● Cas particulier d'un incendie dans une galerie en cul de sac

L'incendie dans une galerie en cul de sac est un cas particulier intermédiaire entre les deux cas précédents. D'une part, il se rapproche de l'incendie avec déstratification des fumées, car l'extraction des fumées se fait uniquement à partir de la gaine d'extraction d'air du chantier, mais d'autre part, la faible distance entre le lieu de l'incendie et ce point d'évacuation des fumées limite l'envahissement de la galerie par les fumées.

Deux situations sont possibles (cf. Figure 11.4.5) : si les personnes peuvent évacuer en amont aérée de l'incendie, elles rejoignent, par la recoupe la plus proche, la galerie contiguë qui est alimentée en air frais ; dans le cas contraire, elles rejoignent le refuge mobile¹⁶⁷ dans l'attente des secours.

¹⁶⁷ Ce refuge mobile, équipé de parois coupe-feu, dispose de réserves d'air comprimé et d'eau.

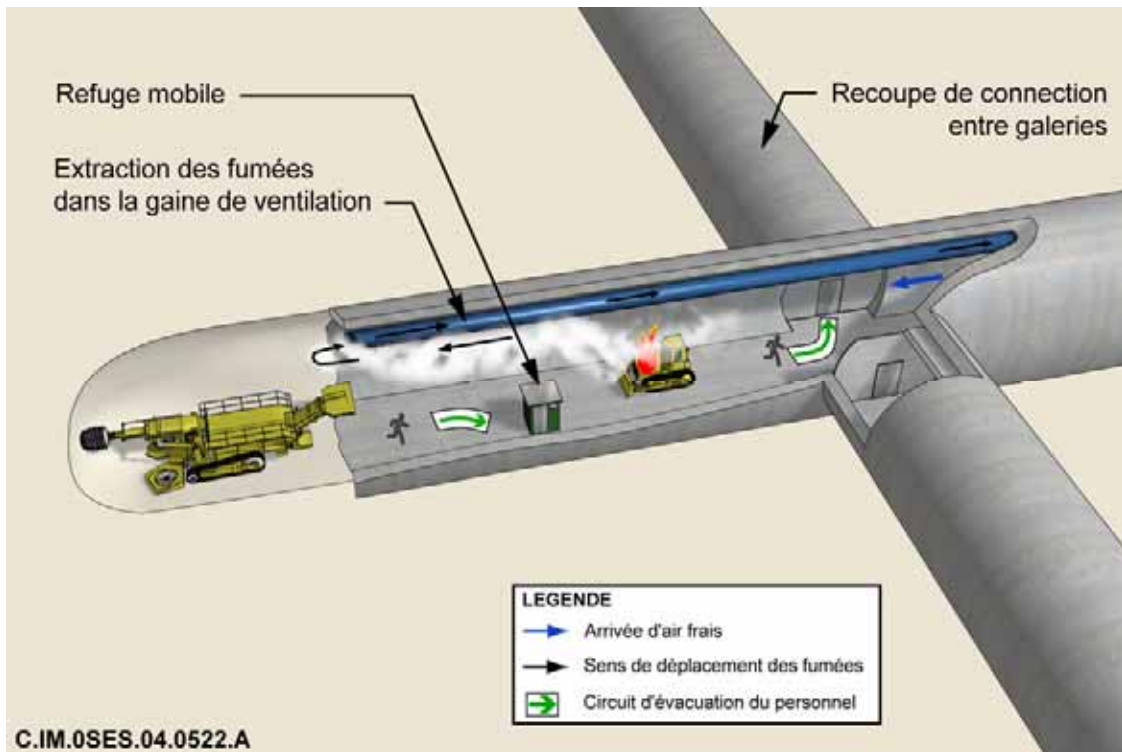


Figure 11.4.5 Incendie dans une galerie en cul de sac : évacuation du personnel par une recoupe vers la galerie contiguë ou mise en sécurité dans un refuge mobile

Dans tous les scénarios d'incendie présentés, le personnel peut ensuite rejoindre, par des galeries de liaison alimentées en air frais, le puits de transport du personnel afin de remonter en surface.

11.4.2 Simulation des conditions d'évacuation du personnel

Les résultats de ces études préliminaires de simulation sont présentés comme précédemment par type d'incendie, car les conditions d'évacuation du personnel sont directement liées au fait qu'il y ait ou non stratification des fumées.

11.4.2.1 Incendie avec déstratification des fumées

L'exemple présenté est l'incendie d'un engin de puissance thermique de 15 MW dans une galerie d'accès aux alvéoles C. Cette puissance correspond à la puissance maximale des engins utilisés en exploitation nucléaire.

Le cas retenu est celui d'un incendie situé juste après une intersection, ce qui correspond à une distance d'évacuation maximale pour rejoindre la première recoupe, soit près de 200 m.

Les données obtenues¹⁶⁸ (température, concentration en monoxyde de carbone et opacité du mélange air/fumées) sont à comparer aux seuils admissibles qui caractérisent les conditions de survie et d'évacuation pour ce type d'incendie. La température ne doit pas dépasser 80 °C, pendant une durée supérieure à 15 minutes. La teneur en monoxyde de carbone ne doit pas excéder les valeurs d'une fourchette estimée entre 500 ppm pendant 60 minutes et 3 000 ppm pendant 10 minutes. Enfin, une opacité supérieure à 0,3 m⁻¹ correspondant à une visibilité en marche de 7 m commence à gêner l'évacuation des personnes ; elle devient difficile pour une opacité supérieure à 1 m⁻¹ (visibilité inférieure à 1,5 m).

¹⁶⁸ L'évolution de la température a été calculée en appliquant les lois de la convection thermique en écoulement turbulent de flux d'air. Les évolutions de l'opacité et de la concentration en monoxyde de carbone ont été simulées numériquement, comme la température, au moyen du logiciel Camatt (Calcul Monodimensionnel Anisotherme Transitoire en Tunnel).

Les résultats des simulations sont présentés en mettant en exergue les conditions d'évacuation du personnel sous deux hypothèses : une vitesse d'évacuation de 1 m/s correspond à un cas normal ; une vitesse de 0,5 m/s serait celle d'un groupe devant évacuer un blessé.

● Température

Le diagramme [distance en aval du feu (m)/temps après départ du feu (s)/température (°C)] met en évidence l'influence du système de désenfumage¹⁶⁹ dont la mise en route infléchit la montée de la température de l'air dans les galeries en aval aérée de l'incendie.

La simulation (cf. Figure 11.4.6) montre que l'évacuation des personnes situées en aval de l'incendie devrait se faire dans des conditions acceptables même pour les personnes proches du départ de feu. Les personnes évacuant à vitesse normale atteignent la recoupe dans une atmosphère à une température d'air inférieure à 30 °C, et entre 40 °C à 50 °C si elles sont ralenties par la présence d'un blessé. Ces conditions restent acceptables par rapport au seuil de 80 °C mentionné précédemment.

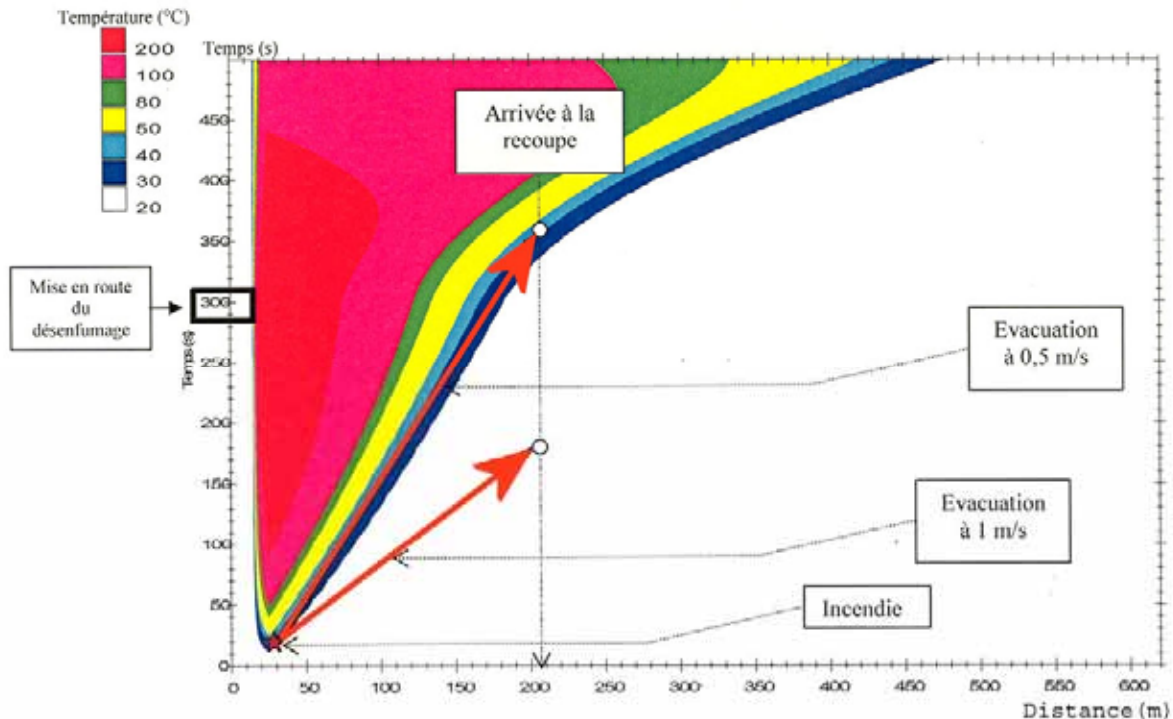


Figure 11.4.6 Evolution spatio-temporelle de la température de l'air (°C) dans le cas d'un incendie dans une galerie d'accès aux alvéoles C en exploitation nucléaire – Représentation du déplacement des personnes situées en aval aérée de l'incendie

● Concentration en monoxyde de carbone

Selon la même approche que précédemment, la simulation montre que les personnes situées en aval aérée de l'incendie évacuant à vitesse normale peuvent atteindre la recoupe dans des conditions saines. Avec une vitesse d'évacuation réduite à 0,5 m/s, les personnes arrivent à la recoupe dans une atmosphère dont la teneur en CO (de l'ordre de 200 ppm) reste inférieure au seuil de 500 ppm.

● Opacité

La simulation montre que les personnes évacuant à 1 m/s peuvent atteindre la recoupe sans gêne avec une opacité qui reste inférieure à $0,10 \text{ m}^{-1}$, ce qui correspond à une visibilité de l'ordre de 10 mètres.

¹⁶⁹ Il a été considéré, que le début de la mise en œuvre des installations de désenfumage se ferait 5 minutes (300 s) après le début de l'incendie et qu'un régime stable serait établi au bout de 8 minutes. Ces données sont issues de l'expérience en ouvrages souterrains.

En revanche, avec une vitesse d'évacuation lente (0,5 m/s), les personnes seraient rapidement rejointes par les fumées, avec une opacité moyenne de l'ordre de $0,6 \text{ m}^{-1}$, soit une distance de visibilité limitée à 2 m. Dans ce cas, le personnel pourrait être amené à s'équiper de ses appareils respiratoires individuels pour parcourir les derniers mètres jusqu'à la recoupe.

11.4.2.2 Incendie avec stratification des fumées

L'exemple retenu est celui de l'incendie d'un engin de puissance thermique de 30 MW en galerie de liaison. Ce cas, qui correspond à un engin de travaux, est un cas enveloppe par rapport à celui d'un engin de transfert de colis qui serait de plus faible puissance thermique (15 MW).

La propagation, la hauteur et la température de la couche de fumée ont été déterminées de manière analytique en exploitant les connaissances des phénomènes de stratification observés dans le cas des tunnels routiers. Les effets liés au rayonnement émis par les fumées de l'incendie sont à comparer au seuil admissible des effets thermiques sur l'homme (2 kW/m^2 pour les personnes non équipées de protection¹⁷⁰).

Les résultats de la simulation (cf. Tableau 11.4.1) montrent que les personnes évacuent en étant soumises à une valeur de rayonnement maximum de $0,9 \text{ kW/m}^2$ au bout de 100 m d'évacuation dans le cas d'une évacuation à la vitesse la plus lente (0,5 m/s), ce qui correspond à des conditions satisfaisantes.

Tableau 11.4.1 Rayonnement thermique reçu pendant l'évacuation dans le cas d'un incendie (30 MW) avec fumées stratifiées en galerie de liaison

Rayonnement thermique reçu par le personnel (kW/m^2)		
Vitesse de déplacement du personnel	0,5 m/s	1 m/s
Localisation par rapport au foyer		
100 m	$0,88 \text{ kW/m}^2$	$0,38 \text{ kW/m}^2$
200 m	$0,56 \text{ kW/m}^2$	$0,38 \text{ kW/m}^2$
400 m	Les fumées n'atteignent pas cette distance en raison de la mise en marche du système de désenfumage	$0,36 \text{ kW/m}^2$

11.4.3 Conclusion

Dans les installations souterraines du stockage, deux types d'incendie peuvent se développer : les incendies avec des fumées stratifiées (dans des galeries de liaison) ou déstratifiées (dans des galeries d'accès aux alvéoles C ou CU). Dans les deux cas, les simulations effectuées tendent à montrer que la conception de l'infrastructure du stockage souterrain avec des faisceaux de galeries parallèles reliées à intervalles réguliers par des galeries de jonction (recoupes) permet aux personnes de s'éloigner du lieu de l'incendie dans des conditions satisfaisantes, de rejoindre rapidement une galerie parallèle alimentée en air frais (hors du circuit des fumées) puis de regagner la surface dans de bonnes conditions.

Dans quelques cas (incendie avec déstratification des fumées et vitesse d'évacuation lente), on ne peut exclure à ce stade que les personnes pourraient être rejointes par les fumées et devraient utiliser leurs protections respiratoire et oculaire individuelles.

¹⁷⁰ Cette puissance relative correspond à une température maximale de la couche de fumée de l'ordre de 200°C , qui induirait une température de couche d'air inférieure à 80°C dans la zone « saine » (cf. Figure 11.4.3)

Un cas particulier est celui dans lequel un incendie se développerait en phase de travaux dans une galerie en cul de sac. Des personnes pourraient se trouver prises entre l'incendie et l'extrémité de la galerie sans pouvoir rejoindre une recoupe pour évacuer. Dans cette situation, elles devraient s'abriter dans un refuge mobile équipé (air comprimé, eau,...) qui aurait les caractéristiques nécessaires de résistance au feu et d'étanchéité aux fumées. Les personnes attendront le secours du personnel d'intervention qui devra arriver sur le lieu de l'incendie pour agir le plus rapidement possible.

Le retour d'expérience en travaux souterrains montre qu'un effort particulier doit être mené sur les mesures de prévention et de formation du personnel, avec des exercices réguliers permettant d'acquérir les réflexes de sauvegarde indispensables. Si les personnes sont bien formées et disposent des moyens adéquats pour intervenir efficacement en cas d'incendie, elles parviennent généralement à éteindre le feu avant qu'il ait eu le temps de se développer. Une intervention par du personnel spécialisé avec un équipement plus conséquent ne serait requise que dans 10 % des départs de feu environ [115].

11.5 Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de transfert des hottes (B, C et CU)

Les hottes de transfert des colis de stockage sont chargées dans les installations nucléaires de surface sur un engin porteur. Celui-ci les amène jusqu'au puits de transfert des colis et les positionne sur un support métallique dans la cage qui les descend ensuite jusqu'au niveau des installations souterraines. Elles sont alors reprises par un engin analogue à l'engin utilisé en surface, qui transporte les hottes jusqu'aux alvéoles de stockage.

En plus des conséquences usuelles du développement d'un incendie (augmentation de température, émission de fumées...), traitées dans la section précédente, l'incendie de cet engin pourrait avoir des conséquences radiologiques s'il affectait la protection assurée par la hotte (protection contre l'exposition externe) et le colis primaire (maintien du confinement).

L'objet de cette section est d'estimer, par des études de simulation [107], si des conséquences radiologiques sont susceptibles de se produire et de proposer, si nécessaire, des mesures complémentaires pour prévenir ce risque ou s'en protéger.

11.5.1 Évaluation des conséquences d'un incendie de l'engin porteur sur la hotte et son contenu

Cette évaluation est réalisée dans l'hypothèse de l'incendie d'un engin porteur de hotte de colis B, C ou CU malgré les mesures de prévention préconisées (cf. section 11.4). La nature de ces colis, l'évolution de leurs caractéristiques en fonction de la température à laquelle ils sont portés ainsi que les principales caractéristiques des hottes sont rappelées dans le Tableau 11.5.1.

Tableau 11.5.1 Caractéristiques principales des colis et hottes de transfert

Colis primaire (température interne)	Données spécifiques relatives aux conditions de température	Colis de stockage	Hotte de transfert	
			Matériau	Épaisseur (mm)
B2.1 ¹⁷¹ boues bitumées (température ambiante)	Enrobé bitumineux : ramollissement à 40°C point éclair à 230°C auto-inflammation à 350°C	Colis béton (avec 4 colis primaires en position verticale)	Acier Ecran thermique ¹⁷²	180 à 220 20
CSD-V déchets vitrifiés (64°C au cœur du déchet)	Cristallisation du verre : 450°C	Surconteneur métallique (avec un colis CSD-V en position horizontale)	Acier interne Neutrophage Acier externe	200 à 230 140 à 150 20
CU1 combustibles usés UOx (87°C au centre de l'assemblage)	Fragilisation de la gaine de l'élément combustible au-delà de 500°C	Conteneur métallique (avec 4 combustibles usés en position horizontale)	Acier interne Neutrophage Acier externe	70 120 20

11.5.1.1 Définition du scénario d'incendie

Le véhicule utilisé pour le transfert des hottes est un engin de transport automoteur électrique sur pneumatiques. Le feu de référence étudié est localisé dans les installations souterraines. Il a été défini à partir des caractéristiques spécifiques de l'engin et des préconisations du Centre d'Etude des Tunnels routiers (CETu) ; il correspond à un incendie d'une puissance thermique de 15 MW pendant une durée d'une heure (cf. section 11.4).

L'incendie se développe dans une galerie de liaison, avec un débit de ventilation en fonctionnement normal de 30 m³/s environ, s'élevant à 50 m³/s après mise en route du système de désenfumage.

11.5.1.2 Données relatives aux études de simulation

La simulation utilise une méthode des éléments finis qui permet une description élaborée des champs de température et une traduction efficace de la non-linéarité des échanges thermiques.

La puissance thermique émise par l'incendie se transmet du foyer à l'ensemble des éléments constituant l'engin de transport et la hotte par un flux convectif et un flux radiatif représentant respectivement 2/3 et 1/3 de la puissance thermique totale de l'incendie¹⁷³ :

- la puissance convective se retrouve dans les fumées émises par le foyer de l'incendie. Elles sont mélangées avec l'air circulant en galerie, enveloppent la hotte et échangent avec elle ;
- la puissance radiative est liée au rayonnement du foyer de l'incendie. Elle s'applique différemment, suivant la forme géométrique de la hotte. Dans le cas des hottes cylindriques (colis C et CU), elle est appliquée uniformément sur le plateau de l'engin, sur le châssis des hottes et sur leur demi-cylindre inférieur. Pour les hottes parallélépipédiques contenant les colis B, cette puissance est appliquée pour moitié sur la face inférieure en contact avec le plateau de l'engin et pour moitié sur les faces latérales.

¹⁷¹ Le colis de boues bitumées a été retenu parmi les différents colis B parce qu'il est celui qui présente le plus de risques d'ignition.

¹⁷² Pour certains colis B (B4, B5), il est prévu un matériau neutrophage dont les caractéristiques lui permettraient de jouer le rôle d'écran thermique, comme pour les colis C et CU.

¹⁷³ Cette répartition correspond aux préconisations du CETu (Centre d'Etudes des Tunnels) pour un incendie de ce type d'engin.

11.5.1.3 Résultats relatifs à un incendie sur la hotte de transfert, le colis de stockage et le colis de déchets de boues bitumées (B2)

Le Tableau 11.5.2 présente les résultats de la simulation d'incendie avec les températures maximales qui seraient atteintes au niveau des faces externes de la hotte de transfert, du colis de stockage et des colis primaires. Il donne également la durée nécessaire depuis le début de l'incendie pour atteindre cette température maximale.

Tableau 11.5.2 *Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire de boues bitumées (B2) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie*

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de Tmax depuis le début de l'incendie
Hotte de transfert	Face inférieure	900	~ 1 h
	Faces latérales	455	~ 2 h
	Face supérieure	127	~ 1 h
Colis de stockage	Selon la face	de 203 à 561	~ 3 h
Colis primaire	Corps du fût	143 (en face inférieure)	~ 16 h
	Déchets	< 120 (sauf en base du colis)	~ 16 h

Les simulations montrent que le risque d'inflammation des déchets de boues bitumées est écarté compte tenu de la conservation de l'intégrité de la hotte, du colis de stockage et de l'enveloppe du colis primaire qui empêche tout contact d'une flamme avec la matrice bitumineuse. Une auto-inflammation des produits bitumineux, qui nécessite une température de l'ordre de 350 °C, ne peut également pas se produire. La seule conséquence de l'incendie sur les déchets serait un ramollissement de l'enrobé bitumineux.

Les températures déterminées montrent que la hotte devrait être faiblement affectée d'un point de vue mécanique, en raison de son épaisseur importante.

Grâce à l'effet bénéfique de l'écran thermique incorporé dans la structure de la hotte, l'enveloppe béton du colis de stockage serait soumise à des températures de l'ordre de 500 °C, qui ne devraient pas affecter l'intégrité du colis.

L'enveloppe métallique des colis primaires, qui est peu sollicitée thermiquement avec des températures maximales de l'ordre de 150 °C (cf. Figure 11.5.1), ne serait pas endommagée par l'incendie.

Ces résultats amènent donc à écarter l'hypothèse d'une détérioration du colis primaire de déchets et d'une perte de confinement.

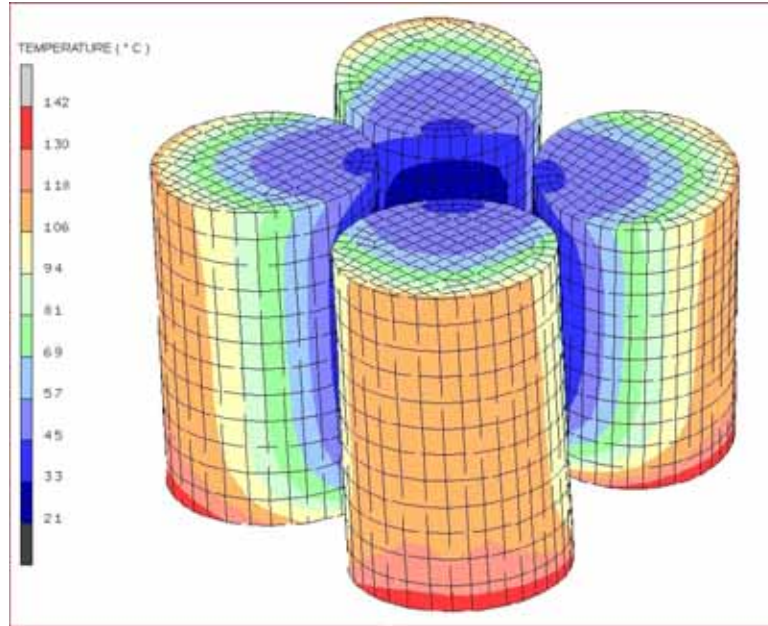


Figure 11.5.1 *Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1) dans le cas d'un incendie de l'engin de transfert¹⁷⁴*

11.5.1.4 Résultats relatifs à un incendie sur la hotte de transfert, le colis de stockage et le colis de déchets vitrifiés (C)

Dans le cas des colis C (cf. Tableau 11.5.3), les simulations montrent que l'épaisseur de la hotte et la présence du matériau neutrophage PPB (Plâtre Polyéthylène Boré), qui joue un rôle d'écran thermique, permettraient de limiter la température au niveau des déchets à 90 °C environ.

Ce résultat apparaît comme une valeur maximale, sachant que la température sur la face externe de la hotte est estimée à environ 1 400 °C, alors que le retour d'expérience sur des incendies en milieu souterrain donnent des températures généralement comprises entre 800 et 1 200 °C [116], [117].

L'intégrité du colis de stockage (surconteneur/conteneur) apparaît donc assurée et la température atteinte dans le colis primaire ne serait pas susceptible de modifier les caractéristiques de la matrice vitreuse des déchets C.

Tableau 11.5.3 *Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire C obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie*

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de Tmax depuis le début de l'incendie
Hotte de transfert	Face externe	1 410	~ 1 h
	Plâtre polyéthylène boré	1 347	~ 1 h
	Face interne	71	~ 4 h
Colis de stockage	Selon la face	70	~ 23 h
Colis primaire	Corps du conteneur	71 à 83	de 23 h à 27 h
	Déchets	92	~ 30 h

¹⁷⁴ Sur cette figure, le foyer d'incendie est localisé sous les colis et l'enveloppe béton du colis de stockage n'est pas représentée.

Compte tenu des températures de l'incendie, la hotte pourrait être affectée par des phénomènes de fluage de l'acier et des défauts de cohésion du PPB. Ceci nécessiterait de contrôler le niveau de protection radiologique avant toute opération de reprise de la hotte.

11.5.1.5 Résultats relatifs à un incendie sur la hotte de transfert, le colis de stockage et les assemblages de combustibles usés (CU1)

Les résultats relatifs à l'incendie d'un engin porteur de hotte de combustibles usés amènent les mêmes commentaires que dans le cas des colis C (cf. Tableau 11.5.4).

Les contraintes thermiques ne seraient pas susceptibles d'induire des conséquences mécaniques sur l'assemblage de combustibles usés. Il n'y aurait pas de risque d'endommagement, car ils ne subiraient qu'une élévation d'une quinzaine de degrés par rapport à leur température initiale.

Comme précédemment, les résultats obtenus amènent à écarter l'hypothèse d'une détérioration du colis de combustibles usés susceptible d'avoir des conséquences radiologiques.

Tableau 11.5.4 Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et des combustibles usés (CU1) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de Tmax depuis le début de l'incendie
Hotte de transfert	Face externe	1 280	~ 1 h
	Plâtre polyéthylène boré	1 250	~1 h
	Face interne	271	~2 h
Colis de stockage	Conteneur	98	~4 h
	Insert	69	~8 h
	Etui	67	~9 h
Assemblage de combustibles usés	Centre de l'assemblage	100	-

11.5.2 Conclusion

En phase de transfert entre les installations de surface et les alvéoles de stockage, l'incendie d'un engin porteur de hotte ne devrait pas avoir de conséquences thermomécaniques pouvant affecter l'intégrité des colis de déchets transportés, qui bénéficient d'une double protection : la hotte de transfert, dont l'un de ses constituants a une capacité d'écran thermique, et le colis de stockage.

En revanche, il serait nécessaire que les opérations d'intervention consécutives à l'accident soient menées après contrôle du niveau de protection radiologique assuré par la hotte. Dans le cas où ce niveau serait insuffisant, les interventions nécessiteraient, par exemple, l'utilisation de protections radiologiques mobiles.

11.6 Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de manutention des colis B

Dans les installations de surface, les colis de stockage de déchets B¹⁷⁵ sont mis en place dans la hotte de transfert par un engin de manutention élévateur à fourches à alimentation électrique. Ils sont ensuite déplacés dans cette hotte jusqu'à l'alvéole de stockage où ils sont repris par le même type d'engin pour leur mise en alvéole.

En plus des conséquences usuelles du développement d'un incendie (augmentation de température, émission de fumées,...), l'incendie de l'engin de manutention des colis de stockage B à l'intérieur de l'alvéole pourrait avoir des conséquences radiologiques s'il affectait la fonction de maintien du confinement du colis primaire.

L'objet de cette section est d'estimer, par des études de simulation [107], si des conséquences radiologiques sont susceptibles de se produire et, si nécessaire, de proposer des mesures complémentaires pour prévenir ce risque ou s'en protéger.

11.6.1 Évaluation des conséquences thermomécaniques d'un incendie sur le colis de stockage et les colis primaires contenus

Cette évaluation est réalisée dans l'hypothèse d'un incendie de l'engin de manutention d'un colis de stockage malgré les mesures de prévention prises (cf. section 11.4). Les caractéristiques du colis de stockage ont été précédemment décrites dans le Tableau 11.5.1.

11.6.1.1 Définition du scénario d'incendie

Le scénario retenu est celui qui surviendrait au cours d'une manutention des colis de type B2 car la matrice bitumineuse des déchets de ce type de colis apparaît comme la plus sensible à une élévation de température. D'autre part, le cas de l'incendie de l'engin en souterrain a été étudié préférentiellement parce que cet engin apparaît avoir un potentiel calorifique plus élevé que l'engin de surface.

L'engin de manutention à fourches utilisé pour transférer les colis de stockage de leur hotte vers leur emplacement définitif en alvéole de stockage serait un véhicule automoteur électrique sur rails. L'incendie considéré surviendrait pendant le transfert du colis de stockage entre l'entrée de l'alvéole et les piles de colis déjà stockés. Il serait d'origine électrique et impliquerait les batteries et les moteurs de l'engin. Le scénario tient compte de la mise en place d'un écran thermique de 2 cm d'épaisseur entre la partie motorisation de l'engin et la partie manutention.

Les caractéristiques de l'incendie ont été définies à partir des caractéristiques de l'engin ; il lui correspond une puissance thermique de 3 MW pendant une durée d'une demi-heure. Cet incendie se développe dans une alvéole dans laquelle le débit de ventilation est de l'ordre de 3 m³/s.

11.6.1.2 Hypothèses relatives aux études de simulation

La méthodologie utilisée est similaire à celle présentée pour l'incendie en transfert de colis (cf. 11.5.1.2). La seule différence est liée au fait que le colis de stockage est situé en position latérale par rapport au foyer de l'incendie qui serait situé au niveau des batteries de l'engin. Dans ces conditions, il est considéré que la puissance radiative appliquée du côté du colis correspond à la moitié de la puissance radiative totale et celle-ci se répartit pour 50 % sur la face latérale directement soumise à l'incendie, et pour 50 % sur les quatre faces qui lui sont adjacentes.

¹⁷⁵ Ce cas de figure ne concerne pas les colis C et CU introduits directement depuis la hotte dans leurs alvéoles sans nécessiter l'intervention d'un engin supplémentaire.

11.6.1.3 Comportement thermique du colis de stockage et du colis primaire de boues bitumées B2 lors de l'incendie

Le Tableau 11.6.1 présente les résultats de la simulation avec les estimations de températures qui seraient atteintes au niveau des différentes faces du colis de stockage et au niveau des colis primaires pendant l'incendie. Il indique également la durée nécessaire depuis le début de l'incendie pour atteindre la température maximale.

Tableau 11.6.1 *Températures estimées au niveau du colis de stockage et des colis primaires de boues bitumées obtenues par simulation numérique de conditions d'incendie*

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de T max depuis le début de l'incendie
Colis de stockage	Face latérale, du côté du foyer de l'incendie	521	~ 30 mn
	Faces adjacentes	319	~ 30 mn
	Face opposée	134	~ 30 mn
Colis primaires situés du côté du foyer de l'incendie	Corps du fût	98	~ 4 h
	Déchets	66 à 97	~ 3 h

Les simulations montrent que le risque d'inflammation des déchets est écarté, compte tenu de la protection assurée par l'enveloppe béton du colis de stockage qui empêche tout contact direct d'une flamme avec la matrice bitumineuse. Une auto inflammation des enrobés bitumineux, qui nécessite une température de l'ordre de 350 °C, ne peut également se produire. La seule conséquence de l'incendie sur les déchets serait un ramollissement de l'enrobé bitumineux lié à son échauffement. Des mesures de protection complémentaires comme l'arrêt ou la diminution du flux de ventilation en alvéole (clapet coupe-feu) pourraient aussi être retenues pour isoler l'alvéole concernée et diminuer l'intensité de l'incendie.

Les colis primaires seraient soumis à des niveaux de température inférieurs à 100 °C pour les deux colis les plus exposés, côté incendie, ce qui n'endommagerait pas leur enveloppe métallique et n'affecterait pas les déchets bitumineux contenus. Leur température moyenne serait d'une quarantaine de degrés (cf. Figure 11.6.1).

L'enveloppe béton du colis de stockage serait soumise à des températures de l'ordre de 500 °C, qui ne devraient pas affecter son intégrité. En revanche, ses propriétés mécaniques pourraient être altérées et un phénomène d'écaillage est susceptible de se produire à sa surface¹⁷⁶.

Dans tous les cas, les résultats obtenus amènent à écarter l'hypothèse d'une détérioration du colis de boues bitumées susceptible d'avoir des conséquences radiologiques.

¹⁷⁶ Des essais ont montré que des colis béton fibres d'épaisseur comparable soumis à une température moyenne de 800°C pendant 30 mn pouvaient montrer des phénomènes d'écaillage superficiel de la surface lié au contact de la flamme, mais sans éclatement du béton.

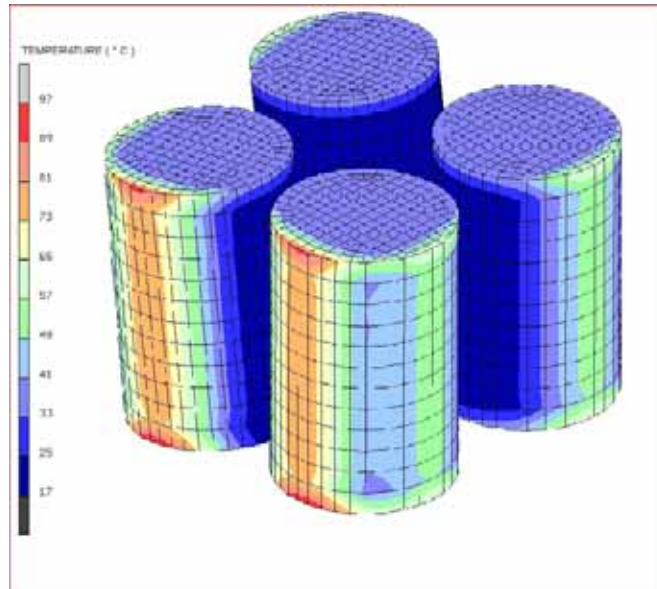


Figure 11.6.1 *Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1) dans le cas d'un incendie en alvéole de stockage¹⁷⁷*

11.6.2 Conclusion

L'incendie de l'engin de manutention utilisé pour la mise en place des colis de boues bitumées dans l'alvéole de stockage ne devrait pas avoir de conséquences radiologiques, car l'enveloppe béton du colis de stockage et un écran thermique placé entre la source d'incendie et le colis protègent efficacement les fûts de boues bitumées. D'autre part, la température, qui devrait être limitée à une centaine de degrés, n'est pas de nature à provoquer l'auto inflammation du bitume.

11.7 Étude des conséquences d'une chute de cage lors du transfert des colis de stockage en puits

On retient une chute libre de la cage depuis la surface¹⁷⁸ comme scénario accidentel de chute en puits.

Dans ce cadre, les études s'attachent d'abord aux estimations des conséquences mécaniques de la chute sur les différents constituants du mobile (cage, hotte, colis de stockage, colis primaires) avant d'estimer quelles pourraient être les conséquences radiologiques si l'impact mécanique de la chute induisait une perte de confinement des colis de déchets transportés et un relâchement de matières radioactives [107].

Elle comprend aussi une analyse du risque de criticité [55] qui pourrait être consécutif à la chute de la cage lors d'un transfert de colis de combustibles usés.

¹⁷⁷ Le foyer d'incendie est placé latéralement à gauche des colis et l'enveloppe béton du colis de stockage n'est pas représentée.

¹⁷⁸ Les accidents de chute de cage liés à une défaillance mécanique du système sont extrêmement rares. En France, le dernier accident grave connu a eu lieu à Reumaux (Lorraine) en 1925. Il était dû à une défaillance de frein qui a engendré une chute de cage sur 600 m environ dont les 170 derniers en chute libre après rupture du câble (il s'agissait d'un treuil à tambour). Il n'y avait ni système anti-chute, ni amortisseur en fond de puits. Cet accident a coûté la vie à 55 mineurs, alors que 28 mineurs, qui étaient tous dans le compartiment supérieur de la cage, ont été dégagés vivants.

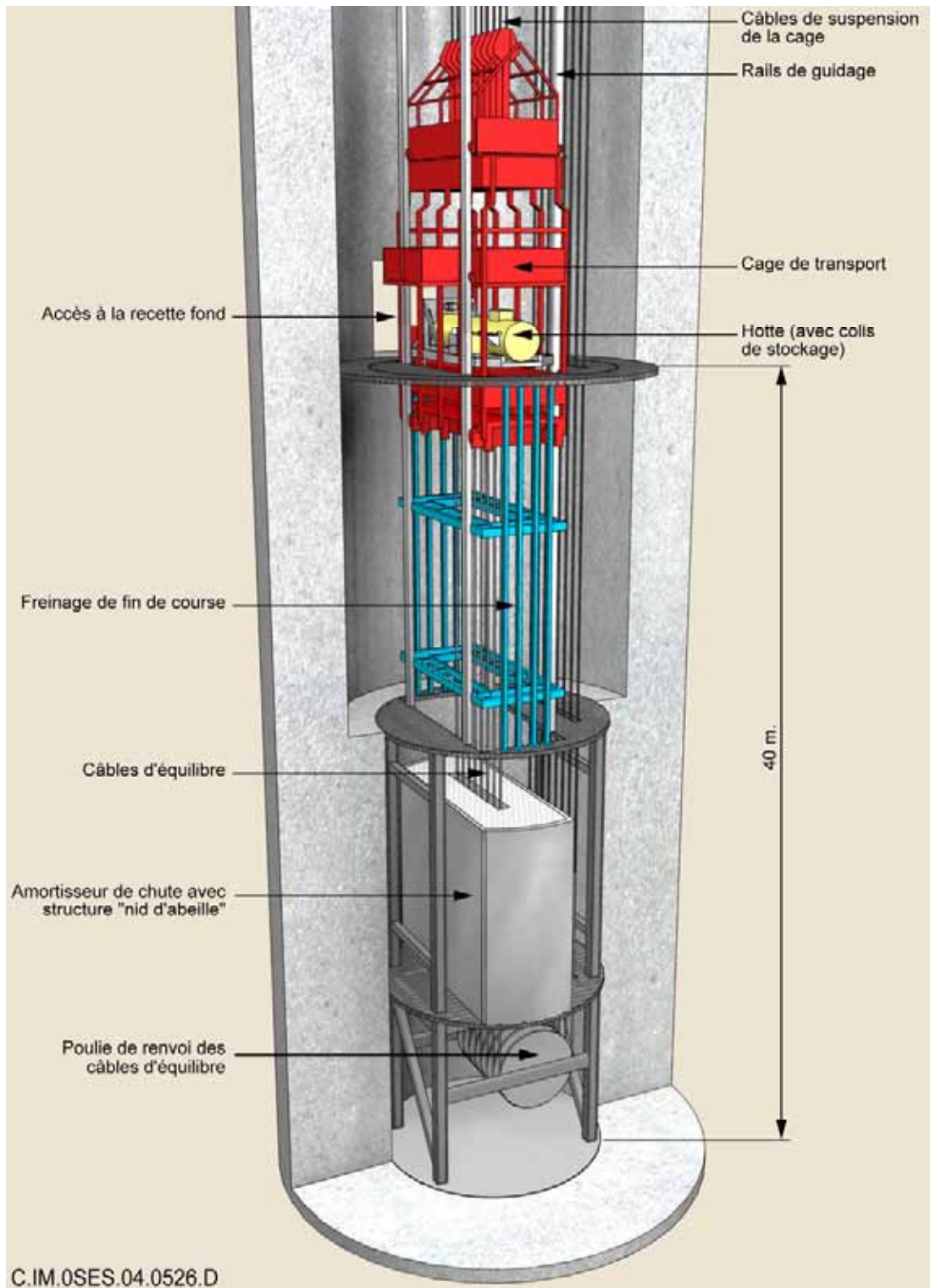


Figure 11.7.1 Représentation 3D de la partie basse du puits avec le système amortisseur de chute

11.7.1 Evaluation des conséquences mécaniques d'une chute de la cage en puits

Cette évaluation a été faite pour les colis de stockage B, C et CU suivants (cf. Tableau 11.7.1).

Tableau 11.7.1 Données principales relatives aux cas de chute en puits étudiés

Colis primaire	Colis de stockage	Hotte de transfert (masse en charge)
B2.1 : boues bitumées ¹⁷⁹	Colis béton ¹⁸⁰ (avec 4 colis primaires en position verticale)	Hotte parallélépipédique (40 t environ)
CSD-V : déchets vitrifiés	Surconteneur métallique (avec un conteneur CSD-V en position horizontale)	Hotte cylindrique (50 t environ)
CU1 ¹⁸¹ : assemblages de combustibles usés	Conteneur métallique (avec 4 assemblages de combustibles usés en position horizontale)	Hotte cylindrique (100 t environ)

11.7.1.1 Scénario de chute

Le scénario envisagé est celui d'une chute libre de la cage¹⁸² sur toute la hauteur du puits qui impacterait un système amortisseur de chute placé en fond de puits¹⁸³.

Ce scénario, qui est majorant au niveau de la hauteur de chute, ne tient pas compte :

- du fonctionnement du système anti-chute de la cage ;
- de l'effet éventuel de freinage lié à un frottement ou un coincement des câbles de suspension de la cage pendant la chute ;
- de l'effet du freinage de fin de course installé en fond de puits.

11.7.1.2 Données relatives aux études de simulation

L'approche par simulation¹⁸⁴ numérique se fait par étapes en quantifiant les conséquences de la chute successivement sur la cage, la hotte, le colis de stockage et le(s) colis primaire(s) transporté(s). L'état de chaque élément de ces objets à l'issue de la chute est caractérisé par sa déformation plastique qui correspond au cumul de l'ensemble des types de déformations subies (dilatation, distorsion,...). Le coefficient correspondant, exprimé en %, peut être comparé à la valeur caractéristique admissible (VCA) du matériau qui constitue cet élément. Le risque de rupture est analysé en fonction des valeurs du coefficient de déformation et de la localisation, la forme et l'extension de la zone déformée.

¹⁷⁹ Le colis de stockage B2.1 a été retenu pour représenter la famille des colis B, parce qu'il correspondait au colis primaire (fût métallique de faible épaisseur) le plus fragile.

¹⁸⁰ Pour la simulation, on a pris les caractéristiques d'un colis de stockage en béton fibré non armé, plus vulnérable à l'effet d'une chute que le colis de stockage renforcé par des armatures métalliques.

¹⁸¹ Le colis CU1 (UOx), qui contient plusieurs assemblages, apparaît mécaniquement plus fragile vis-à-vis du risque de chute que le colis CU2 (MOx) qui ne contient qu'un assemblage.

¹⁸² Dans ce scénario, la rupture des câbles de suspension de la cage a aussi pour conséquence la chute du contrepoids sur une cinquantaine de mètres jusqu'en fond de puits.

¹⁸³ Plusieurs éléments techniques conditionnent le dimensionnement de l'amortisseur : la masse la plus lourde transportée, la limitation de la décélération de la hotte à une valeur n'induisant pas d'endommagement mécanique majeur, la limitation de l'écrasement de l'amortisseur à la moitié de sa hauteur. Afin de minimiser l'effet de l'impact sur le mobile, il est également envisagé d'utiliser un amortisseur de chute avec un étage supérieur de seuil d'écrasement inférieur à celui de l'étage inférieur pour qu'il fonctionne de la manière la plus progressive possible.

¹⁸⁴ Les études de simulation de chute ont été réalisées avec le logiciel Radioss, qui permet d'étudier par éléments finis tout comportement fortement non linéaire d'une structure soumise à des sollicitations pouvant aller du quasi-statique à la dynamique rapide. Radioss intègre temporellement les équations de la dynamique non linéaire par une approche explicite.

11.7.1.3 Conséquences d'une chute de la cage en puits

Après une analyse du bilan énergétique de la chute, l'état du colis primaire est examiné avec l'objectif de savoir si les dommages occasionnés par la chute sur l'amortisseur sont ou non susceptibles de se traduire in fine par une perte de confinement et un relâchement de radionucléides.

● Bilan énergétique

Le bilan énergétique, illustré par la chute de la hotte de déchets C (cf. Figure 11.7.2), montre que la plus grande partie de l'énergie cinétique incidente a été transformée au cours de l'impact en énergie interne de déformation en un temps très court.

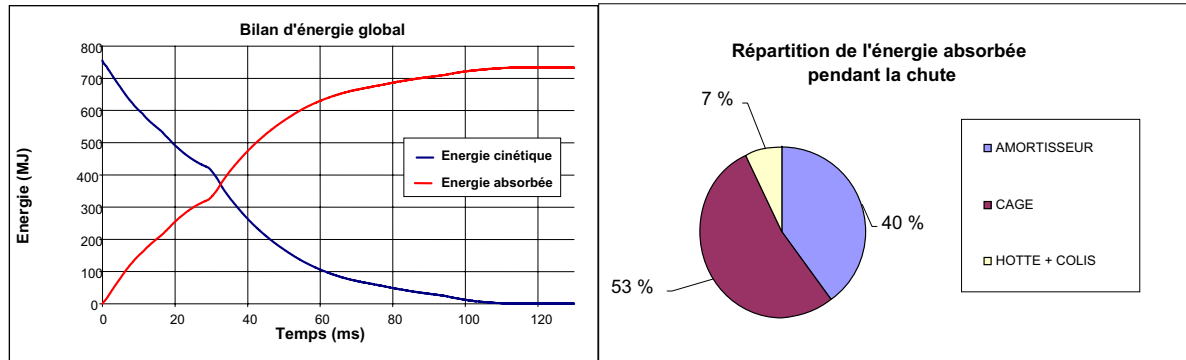


Figure 11.7.2 Bilan énergétique d'une chute en puits d'une cage transportant une hotte avec déchets C

Plus de 99 % de l'énergie du choc est absorbée par l'amortisseur, la cage et la hotte. Le colis de stockage absorbe moins de 1 % de l'énergie. Cette répartition reste valable pour les chutes de colis B et CU.

● Conséquences mécaniques de la chute sur les colis primaires de déchets

L'estimation des déformations observées sur les colis primaires permet d'appréhender le risque de perte de confinement de matières radioactives, à travers les deux éléments d'appréciation suivants :

- la valeur maximale du coefficient de déformation du colis primaire, qui est une donnée indicative (car une valeur de déformation élevée limitée à quelques éléments du maillage n'est pas significative) ;
- la surface du colis primaire pour laquelle le coefficient de déformation est supérieur à la valeur caractéristique admissible (VCA), ce qui signifie un risque de rupture.

Les résultats des simulations (cf. Tableau 11.7.2) montrent que, pour l'ensemble des colis B, C et CU, le risque de perte de confinement des matières radioactives est écarté puisqu'aucune valeur de déformation n'est supérieure à la VCA du matériau constitutif du colis primaire. On peut cependant noter que les colis B sont les colis primaires qui subissent les déformations les plus élevées et qu'il subsiste une incertitude, en particulier pour les colis type B2, quant à la tenue au choc du sertissage de leur couvercle.

Tableau 11.7.2 Estimations des déformations subies par les colis à l'issue de la chute sur l'amortisseur

Type de colis	Localisation	Déformation maximale (%)	VCA (%)	Surface pour laquelle la déformation dépasse la VCA
B (B2.1)	Colis primaire	25,9	35	Aucun dépassement n'est constaté pour les différents types de colis. Il n'y aurait pas rupture de leur enveloppe
C (CSD-V)	Colis primaire	0,3	35	
CU1 (assemblages nus)	Logement de section carrée contenant l'assemblage de combustible	1,2	26	
CU1 (assemblages en étuis)	Etui cylindrique contenant l'assemblage de combustible	17,4	40	

Les résultats des études de simulation soulignent l'intérêt d'installer, dans le puits de transfert des colis, un amortisseur de chute. Celui-ci devrait permettre d'éviter la rupture de l'enveloppe métallique de la hotte de transfert en cas de chute de la cage.

A l'intérieur de cette hotte, les premières estimations tendent à montrer que les colis primaires C ainsi que les tubes ou étuis contenant les combustibles usés devraient résister au choc sans rupture. En ce qui concerne les colis primaires B, un endommagement des colis les plus fragiles, comme les colis de type B2, ne peut être totalement exclu.

11.7.2 Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de la cage en puits

La prise en compte des résultats des études relatives aux conséquences mécaniques d'une chute de cage conduirait à considérer qu'il n'y a pas de perte de confinement de matières radioactives lors du transfert de colis en puits.

Cependant, compte tenu des incertitudes sur le déroulement de la chute en puits et sur la définition du mobile, des scénarios de relâchement de matières radioactives ont été envisagés pour estimer le risque radiologique qui serait associé [107].

11.7.2.1 Scénarios de relâchement de matières radioactives

Il est fait l'hypothèse d'une ouverture de la porte de la hotte de transfert, d'une rupture du colis de stockage, et d'une rupture du colis primaire qui induiraient un relâchement de matières radioactives mises en suspension dans le puits et rejetées dans l'environnement. Les colis étudiés sont ceux qui présentent le contenu radiologique le plus pénalisant au sein de chaque catégorie. Il est ainsi retenu le colis B5 (déchets B), le colis C3 (déchets C) et le colis CU1 pour les combustibles usés.

Différents jeux de données ont été retenus quant aux quantités de radionucléides susceptibles d'être libérés et relâchés dans l'atmosphère du puits. Les données relatives aux colis B5 ont été définies par

analogie avec des observations faites au cours d'opérations de compactage (l'énergie est du même ordre de grandeur lors d'une chute et lors d'un compactage). Les données relatives aux colis C sont liées à des résultats d'essais de chute. En ce qui concerne les combustibles usés, l'approche paramétrique correspond à des hypothèses sur le degré de détérioration de l'assemblage, avec une rupture des crayons et un broyage des pastilles contenues plus ou moins importants.

11.7.2.2 Données relatives aux études de simulation

L'existence de sas au niveau des recettes (cf. Figure 11.2.3) et l'interdiction d'accès à la zone du puits pendant une opération de transfert de colis sont des mesures qui devraient permettre d'éviter tout risque radiologique pour les personnes présentes dans les ouvrages souterrains. Aussi, aucune estimation n'a été faite pour le personnel affecté aux installations souterraines.

Les conséquences radiologiques d'un éventuel rejet radioactif dans l'environnement en sortie de puits de ventilation ont été estimées en tenant compte de l'ensemble des voies potentielles d'exposition :

- l'exposition liée au passage du panache des rejets induit une exposition externe et une exposition interne par inhalation ;
- l'exposition liée aux dépôts laissés par le panache induit une exposition externe, une exposition interne par inhalation suite à la remise en suspension et une exposition interne par ingestion d'aliments.

11.7.2.3 Résultats

Les études de simulation montrent que le phénomène de mise en suspension instantanée au moment de l'impact apparaît prépondérant par rapport au phénomène de mise en suspension lié à un balayage par l'air circulant dans le puits. Les radionucléides relâchés seraient totalement libérés dans l'environnement avec des conséquences potentielles sur une personne en limite de site, considérée par hypothèse à 500 m de l'émissaire du rejet.

Les voies prépondérantes d'exposition seraient, pour les trois types de déchets, l'inhalation due au passage du panache de radionucléides et, à un moindre degré, l'ingestion alimentaire.

Les résultats préliminaires des simulations effectuées amèneraient à envisager des mesures de réduction du risque avec, notamment, la possibilité d'une filtration sur le circuit de retour d'air des installations souterraines. Avec ce type de dispositif¹⁸⁵, qui est couramment utilisé dans des installations nucléaires de surface existantes, la dose totale d'exposition serait de l'ordre de 1 mSv¹⁸⁶ pour une personne en limite de site.

Une autre mesure envisageable consisterait à isoler la zone des puits (puits de descente des colis et puits de retour d'air) et ensuite, à faire un état des lieux avant de procéder à une intervention adaptée à la nature, l'importance et l'extension de la zone contaminée.

11.7.3 Analyse du risque de criticité

Sur la base des concepts de colis définis à ce jour et pour le mouvement d'un seul colis de stockage dans le puits, les situations accidentelles de chute des colis de stockage B et C ne présentent pas de risque de criticité, quelle que soit la géométrie du colis de stockage après la chute, compte tenu de la faible quantité de matière fissile contenue dans ces colis.

Pour les colis de combustibles usés, l'endommagement des assemblages (désolidarisation des crayons, rupture des gaines...) et leur rapprochement suite à la chute de la cage pourraient induire un phénomène de criticité s'il y avait en plus une venue d'eau au sein des assemblages [55].

¹⁸⁵ Il pourrait être intéressant d'asservir les mouvements de descente de cage à la mise en route de l'unité de filtration pour s'affranchir d'un mode de filtration en continu avec des volumes d'air importants. Ce type de fonctionnement a été retenu dans le stockage américain de déchets transuraniens du WIPP, New Mexico [114], où l'unité de filtration installée sur le puits de retour d'air n'est mise en marche qu'en cas d'incident.

¹⁸⁶ Cette valeur est à confronter avec le fait que des dispositions spécifiques sont prévues réglementairement vis-à-vis du public lorsque des situations accidentelles induisent des doses supérieures à 10 mSv.

Un tel niveau d'endommagement n'apparaît pas vraisemblable au vu des résultats des simulations de chute. Cependant, par précaution, des mesures de conception visant à empêcher toute présence d'eau dans le puits seraient à retenir (cf. §11.2.2.2) pour s'affranchir complètement de ce risque.

11.7.4 Conclusion

En phase de transfert des colis en puits, le risque de chute de la cage présente une probabilité d'occurrence très faible du fait des mesures de prévention préconisées. Malgré ces dispositions, en cas de chute libre du mobile dans le puits, la présence d'un amortisseur de chute en fond de puits permet de limiter l'endommagement de la hotte de transfert qui conserverait, au vu des résultats d'études de simulation, son intégrité mécanique.

Cependant, compte tenu des incertitudes des simulations de chute (définition du mobile, conditions de chute), il a été envisagé la possibilité d'un relâchement de radionucléides dans l'environnement au niveau du point de rejet. Pour estimer les conséquences radiologiques d'un tel événement, différents cas de figure ont été définis dans le cadre d'une approche paramétrique. Ceci a permis de proposer des dispositions techniques permettant de limiter le relâchement des radionucléides : une première consisterait à piéger les radionucléides par épuration de l'air au niveau du puits de ventilation, une autre serait d'obturer la zone entre le puits de colis et le point de rejet pour éviter tout risque de dissémination. Dans les deux cas, une mise en sécurité des installations et des mesures de contrôle seraient nécessaires avant de procéder, si nécessaire, à des opérations de décontamination.

Le risque de criticité associé à une chute d'un colis de combustibles usés n'est pas envisageable du fait de l'ensemble des dispositions proposées pour limiter l'endommagement du colis et en raison de l'absence d'eau dans le puits.

11.8 Étude des conséquences d'une chute de colis de stockage B lors de sa mise en place en alvéole de stockage

La manutention des colis de stockage B est assurée par un engin commandé à distance par un opérateur hors de l'alvéole. L'analyse de risque a conduit à retenir comme scénario accidentel celui d'une chute d'un colis en alvéole de stockage au moment où celui-ci serait placé au niveau supérieur d'une pile de colis. Ce scénario est un scénario enveloppe vis-à-vis des opérations de manutention dans l'ensemble des installations du stockage.

Des simulations [107] s'attachent d'abord aux estimations des conséquences mécaniques de la chute sur les colis avant d'estimer quelles pourraient en être les conséquences radiologiques. Il est prévu de valider les résultats de ces simulations par des essais de chute des colis de stockage à échelle réelle au cours de l'année 2005.

11.8.1 Évaluation des conséquences mécaniques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage

L'évaluation des conséquences mécaniques d'une chute d'un colis de stockage a été réalisée par modélisation numérique pour les différents types de conteneur envisagés : conteneur standard et conteneur à capacité de rétention renforcée (cf. section 4.1). Ils sont représentés respectivement par un colis de type B.2.1 et un colis de type B.5.2 (cf. Tableau 11.8.1).

Tableau 11.8.1 Caractéristiques principales des colis de stockage étudiés [41]

Colis primaire Nature des déchets	Nombre de colis primaires par colis de stockage	Type de conteneur
B2.1 : boues bitumées	4	Conteneur standard (le corps et le couvercle préfabriqués sont en béton armé et fibré)
B5.2 (CSD-C) : mélange de coques et embouts, et de déchets technologiques	4	Conteneur à capacité de rétention renforcée (le corps préfabriqué et les couvercles individuels coulés sont en béton fibré)

11.8.1.1 Scénario de chute

Le scénario de chute retenu est fondé sur l'hypothèse d'un basculement et d'un retournement du colis de stockage suivi d'une chute verticale du colis tombant en un coin du couvercle sur un sol indéformable. Le centre de gravité du colis est situé à la verticale du point d'impact (cf. Figure 11.8.1). Cette configuration est plus sévère que des cas de « chute à plat » ou de « chute sur arête ».

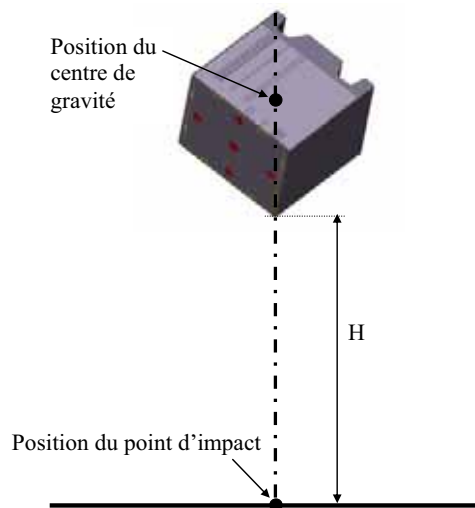


Figure 11.8.1 Scénario de chute d'un colis de stockage sur le sol de l'alvéole

Ce scénario a été modélisé pour une hauteur de chute de 6 m¹⁸⁷, qui correspond à la hauteur de manutention maximale des colis de stockage au moment de leur mise en place en alvéole.

11.8.1.2 Données relatives aux études de simulation

Les études de simulation ont été réalisées avec la même démarche que dans le cas des études de chute en puits (cf. § 11.7.1.2). Le logiciel utilisé prend en compte la complexité des phénomènes mis en jeu (matériaux soumis à des déformations plastiques, voire des ruptures) et la diversité des matériaux qui constituent le colis de stockage.

¹⁸⁷ La hauteur de chute est définie comme la distance, au début de la chute, entre le point d'impact (coin inférieur du couvercle) et le sol.

11.8.1.3 Conséquences d'une chute d'un colis de stockage

L'objectif des simulations est d'estimer si les dommages occasionnés aux colis primaires par la chute du colis de stockage sur le sol se traduiront in fine par une perte de confinement et un relâchement de radionucléides.

- **Bilan énergétique**

Le bilan énergétique montre que la plus grande partie de l'énergie cinétique incidente est transformée au cours de l'impact en énergie interne de déformation en un temps très court. L'enveloppe béton du colis de stockage absorbe 90 % de l'énergie cinétique incidente. Les colis primaires reçoivent les 10 % restants.

- **Conséquences de la chute sur les colis primaires**

Les résultats (cf. Tableau 11.8.2) sont donnés pour l'enveloppe métallique du colis primaire le plus exposé au moment de la chute, qui est celui à proximité immédiate du point d'impact.

Le critère retenu est la déformation de l'enveloppe du colis primaire au regard de la valeur caractéristique admissible (VCA) propre au matériau constitutif de cette enveloppe.

Tableau 11.8.2 Estimation des déformations des colis primaires à la suite d'une chute du colis de stockage

Type de colis	Caractéristiques de la chute	Déformation maximale de l'enveloppe du colis primaire (%)	VCA (%)
B2.1	Chute sur un coin du couvercle	(23) ¹⁸⁸	35
B5.2	Hauteur de chute égale à 6 m	9	35

Les résultats relatifs au colis B2.1 montrent des déformations assez élevées (jusqu'à 23 %) localisées en partie supérieure du colis primaire (cf Figure 11.8.2).

¹⁸⁸ Le conteneur, objet de la simulation, sans armature mais avec une densité importante de fibres métalliques, ne correspond pas strictement au conteneur standard. Aussi, ce résultat est donné à titre indicatif.

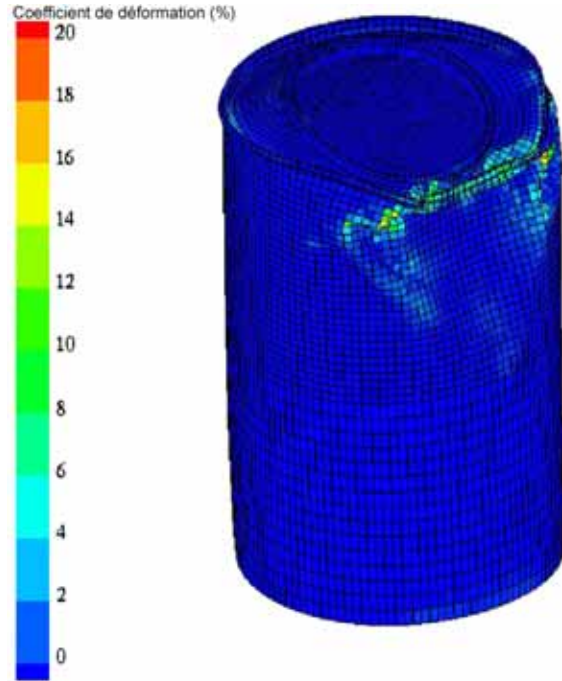


Figure 11.8.2 Déformations plastiques du colis primaire B2.1 (chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin¹⁸⁹)

Les résultats relatifs au colis B5.2 (cf Figure 11.8.3) montrent un endommagement limité du colis primaire en dessous de la collerette de manutention avec une valeur de déformation maximale proche de 10 %.

Coefficient de déformation en %

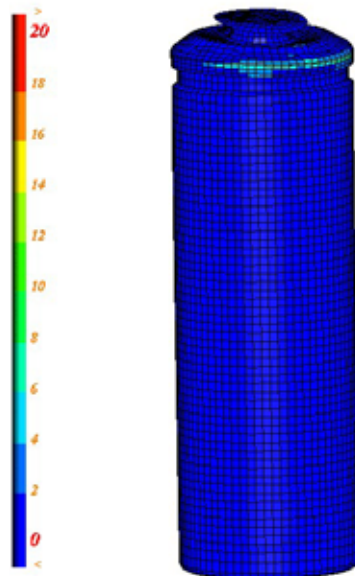


Figure 11.8.3 Déformations plastiques du colis primaire B5.2 (chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin)

¹⁸⁹ Pour mieux visualiser les déformations, le colis primaire est représenté dans sa position initiale avant la chute, c'est-à-dire en position verticale, couvercle en haut.

Dans les deux cas, une chute n'entraînerait pas une perte de confinement des matières radioactives puisqu' aucune valeur de déformation de l'enveloppe des colis primaires n'est supérieure à leur valeur caractéristique admissible (VCA).

Cette conclusion doit cependant être tempérée par le fait que les simulations ne permettent pas de connaître avec certitude le comportement au choc du sertissage des couvercles des colis primaires (colis B2) et le comportement de la jonction entre corps et couvercle du conteneur. Les tests réels de chute permettront de lever les incertitudes à ce sujet et d'apporter, si nécessaire, les adaptations requises à la conception du colis de stockage.

11.8.2 Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage

Compte tenu des résultats des simulations et des incertitudes de modélisation mentionnées précédemment, des scénarios de relâchement de matières radioactives ont été envisagés pour le conteneur standard contenant des colis B2 [107].

11.8.2.1 Hypothèses retenues

Les études de simulation font l'hypothèse d'une ouverture du colis de stockage au niveau de la jonction entre le corps et le couvercle. Cet événement pourrait induire une déchirure locale du (des) colis primaire(s), avec un relâchement de matières radioactives qui seraient mises en suspension dans l'alvéole de stockage. L'air contaminé circulerait dans le circuit de retour d'air avant d'être rejeté dans l'atmosphère au niveau du puits d'extraction.

Différentes hypothèses ont été retenues quant aux quantités de radionucléides susceptibles d'être libérées et relâchées dans l'alvéole. Dans un cas, un seul colis présente une déchirure locale et, dans un autre cas, il est supposé un détachement du couvercle des quatre colis primaires. Il a été aussi tenu compte de la nature de la matrice de boues bitumineuses, qui a une bonne capacité à immobiliser les déchets radioactifs.

11.8.2.2 Conséquences radiologiques d'une chute de colis B2 en alvéole

Les études de simulation montrent que le phénomène de mise en suspension instantanée au moment de l'impact apparaît prépondérant par rapport au phénomène de mise en suspension continue par léchage des matières radioactives par la ventilation.

Les voies prépondérantes d'exposition du public seraient l'inhalation due au passage du panache de radionucléides et, à un moindre degré, l'ingestion alimentaire.

Les simulations montrent que la dose reçue à 500 m du point de rejet serait inférieure à 0,001 mSv, quel que soit le scénario retenu. Cette dose négligeable n'engendrerait pas de conséquences pour les personnes et l'environnement.

11.8.3 Conclusion

Durant les opérations de transfert et de manutention des colis B en alvéoles de stockage, la chute ne devrait pas survenir du fait des mesures de prévention préconisées. Néanmoins, s'il s'avérait que le colis basculait et tombait sur le sol de l'alvéole malgré les dispositions prises, cette chute induirait des détériorations mécaniques du colis de stockage. Les simulations montrent que le ou les colis primaires ne devraient pas subir de rupture de confinement et ne devraient pas libérer de particules radioactives. Cependant, pour les colis de boues bitumées (B2), il a été étudié des scénarios de relâchement de particules dans l'alvéole puis dans l'environnement via les circuits de ventilation. Ceci a conduit à estimer des détriments radiologiques qui s'avèrent négligeables pour le public.

11.9 Synthèse de l'analyse

L'analyse de risque effectuée couvre les activités industrielles de construction, d'exploitation et de fermeture du stockage de déchets radioactifs à vie longue. Menée en liaison avec les études de conception, elle a pour objectif à ce stade d'étude du projet de donner des orientations techniques et de proposer des mesures de réduction de risques éprouvées qui garantissent un fonctionnement sûr et permettent de satisfaire les fonctions de sûreté opérationnelle définies par l'Andra. Cette analyse menée de manière systématique a bénéficié du retour d'expérience d'installations industrielles existantes.

L'évaluation dosimétrique en exploitation des installations a montré que les doses reçues par le personnel et le public seraient inférieures aux contraintes annuelles que s'est fixée l'Andra, soit 5 mSv pour les travailleurs et 0,25 mSv pour le public.

L'analyse de risque a distingué les risques conventionnels, rencontrés classiquement dans toute installation industrielle, les risques liés aux colis de déchets, et les risques liés à l'environnement extérieur du stockage.

Dans les installations de surface, les risques conventionnels existent, à un degré plus ou moins élevé, tout au long des différentes activités du stockage. Il s'agit essentiellement des risques d'écrasement (chute de charges manutentionnées, heurt par un engin ...), des risques de chute liée à des travaux en élévation, des risques d'électrisation ainsi que du risque d'incendie... Ces risques ne justifient pas d'études complémentaires à ce stade, mais seront à considérer avec attention lors de la conception détaillée des ouvrages et des équipements.

Dans les installations souterraines, ces risques sont aussi présents. Parmi eux, le risque d'incendie a fait l'objet d'une étude complémentaire compte tenu de son influence sur la conception des installations. Elle a permis de s'assurer que les solutions préconisées pour la conception des infrastructures et leur exploitation permettraient l'évacuation des personnes dans des conditions de sécurité satisfaisantes.

Les risques liés aux colis de déchets sont, pour l'essentiel, des risques radiologiques. Ils sont présents pendant l'activité d'exploitation du stockage, et à un moindre degré pendant l'activité de fermeture. Ces risques pourraient être associés à des défauts de protection radiologique, à des interventions à proximité d'une source radioactive ainsi qu'à un incendie ou une chute affectant les colis eux-mêmes. Les dispositions envisagées qui bénéficient du retour d'expérience d'installations industrielles similaires doivent permettre de maîtriser ces risques.

Les risques liés à l'environnement du stockage (séisme, conditions météorologiques, chute d'avion...), pris en compte sur la base des pratiques usuelles des installations nucléaires françaises en fonction des caractéristiques locales du site, n'apparaissent pas soulever de difficultés spécifiques.

L'analyse de sûreté opérationnelle conduite n'a pas mis en évidence, à ce stade, d'éléments mettant en cause la faisabilité technique de la construction et de l'exploitation, la fermeture du stockage et sa gestion réversible par étape (avec notamment la possibilité d'un retour en arrière).

12

Synthèse

12.1	Des options techniques simples et robustes	486
12.2	La logique de la réversibilité prise en compte dans l'architecture.....	487
12.3	La sûreté dans l'architecture	488
12.4	Perspectives	489

L'étude montre, du point de vue de l'ingénierie, la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue dans la formation argileuse étudiée. Les options présentées illustrent l'existence de solutions techniques concrètes répondant aux questions posées par la faisabilité d'un stockage. Ces options ont été choisies à ce stade pour leur simplicité et leur robustesse.

Elles couvrent l'ensemble des déchets de haute activité et à vie longue français, existants ou engagés par le parc électronucléaire. Pour ce faire, des hypothèses variées de production et de conditionnement ont été formulées pour les déchets futurs. La diversité des colis primaires de déchets a pu être prise en compte en structurant le modèle d'inventaire au moyen de « colis types » représentatifs de l'ensemble des problématiques introduites par cette diversité. On notera que, sans préjuger de choix de gestion, l'étude a aussi exploré, au-delà des déchets de catégories B (moyenne activité à vie longue) et C (haute activité), le cas de combustibles usés s'il était décidé de ne pas les retraiter.

Les options présentées sont adaptées à la formation argileuse étudiée au moyen du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Pour ce faire, l'étude s'est appuyée sur le corpus de connaissances acquises progressivement au cours des nombreux travaux menés sur le site depuis 1994 (campagnes géophysiques et de forages, essais sur échantillons, données acquises lors du fonçage des puits du laboratoire, galerie expérimentale au niveau -445 mètres). En particulier l'architecture de stockage prend en compte les aspects géométriques de cette formation (épaisseur, profondeur...) ainsi que ses caractéristiques mécaniques et thermiques. Les options présentées mobilisent les propriétés favorables de la formation étudiée en matière de confinement (très faible perméabilité, faibles gradients hydrogéologiques, capacité de rétention et propriétés géochimiques).

Une attention particulière a été portée à la réversibilité du stockage, en réponse aux attentes qui ont été exprimées d'abord dans la loi du 30 décembre 1991, puis à diverses reprises. La réversibilité a ainsi influé de manière significative sur les options d'architecture. Elle se traduit par une grande flexibilité offerte à la gestion des colis stockés et au pilotage du processus de stockage. La sûreté a aussi fortement marqué les choix de conception effectués. Elle constitue en effet l'un des objectifs majeurs, avec le souci de garantir à terme la possibilité d'une sûreté passive assurée par la seule installation.

Les options étudiées ont été confrontées à celles envisagées dans d'autres pays, dans le cadre d'échanges et de coopérations scientifiques et techniques internationales. Il en ressort de nombreux points de convergence. On peut relever à titre d'exemples la conception de colis de stockage, les critères de dimensionnement thermique, ou encore les dispositifs mis en place lors de la fermeture d'un stockage. Un certain rapprochement peut être noté au cours des dernières années en matière de gestion progressive et de réversibilité d'un stockage, même s'il existe encore des différences notables en termes d'approche de la réversibilité, exigence particulièrement développée en France. D'une manière générale, des différences existent entre les solutions techniques proposées au niveau international, qui s'expliquent le plus souvent par le contexte géologique spécifique de chaque pays (formations argileuses ou non, démarche générique ou relative à un site particulier), par les colis de déchets et les inventaires pris en compte en référence (déchets de retraitement ou combustibles usés, taille du parc électronucléaire).

Au stade d'une évaluation de faisabilité, il convient de rappeler que les options étudiées ne peuvent être considérées comme optimisées. Aussi, sans remettre en cause les principes de conception présentés, on peut esquisser quelques perspectives d'étude dans une optique d'amélioration de la conception.

12.1 Des options techniques simples et robustes

Pour évaluer la faisabilité d'un stockage dans la formation argileuse étudiée, l'Andra a retenu des options simples au plan technique et robustes vis-à-vis des limites actuelles des connaissances et de la technologie.

La simplicité des options étudiées favorise la compréhension du fonctionnement d'un stockage, aux différentes échelles de temps. À titre d'exemple, la séparation des divers types de déchets dans des

zones distinctes évite des interactions qui complexifieraient cette compréhension. L'évaluation des performances d'un stockage, en matière de réversibilité et de sûreté, s'en trouve facilitée.

L'existence d'incertitudes sur les données scientifiques a été prise en compte au cours des études, qu'il s'agisse d'incertitudes liées aux connaissances acquises à ce stade, ou d'incertitudes inévitablement afférentes aux grandes échelles de temps qu'impliquent les fonctions de sûreté à long terme d'un stockage. On a privilégié systématiquement le choix d'options robustes vis-à-vis de ces incertitudes.

Par exemple, vis-à-vis du comportement mécanique des argilites, des hypothèses de travail prudentes ont été retenues à ce stade, qui ont probablement conduit à dimensionner les revêtements des ouvrages souterrains avec des marges. Au droit des dispositifs de scellement, on a proposé et étudié des moyens pour interrompre, au plan hydraulique, l'auréole d'argilite qui pourrait être fracturée au voisinage des excavations.

Le caractère simple et robuste des options présentées les rend aussi réalistes d'un point de vue industriel et économique. La faisabilité de la réalisation des différents composants d'un stockage a été vérifiée en s'appuyant sur des procédés éprouvés dans l'industrie (creusement des cavités souterraines, mise en place de soutènements et de revêtements, etc.). On a aussi montré l'existence, ou la possibilité de concevoir, des moyens pour exploiter les installations, sur la base de technologies aujourd'hui disponibles (réception, préparation et mise en place de colis, ventilation et maintenance des installations). De manière générale la faisabilité technologique des options présentées repose sur un retour d'expérience industriel, en privilégiant les analogies avec, notamment, le domaine des travaux souterrains et celui des installations nucléaires. Sur certains aspects spécifiques, cela a été complété par des essais : réalisation de démonstrateurs de conteneurs de stockage, réalisation d'essais relatifs au remblayage et au scellement des ouvrages souterrains.

12.2 La logique de la réversibilité prise en compte dans l'architecture

La demande de réversibilité a été intégrée à l'architecture proposée. Concrètement, cela concerne la durabilité conférée aux ouvrages et aux colis de stockage, la modularité des installations et le choix de processus simples de mise en œuvre du stockage, facilement inversables.

Ainsi, un stockage réversible des déchets se traduit d'abord par une souplesse de gestion des colis stockés similaire à celle d'un entreposage. Les colis de déchets peuvent être retirés aussi facilement qu'ils ont été mis en place, sans détérioration des installations et des colis eux-mêmes. Les études ont montré que cette possibilité s'applique a minima sur des durées séculaires (un à quelques siècles) sans intervention particulière. Si on le souhaitait, des durées plus longues pourraient être envisagées, moyennant toutefois des travaux spécifiques d'une ampleur supérieure (reprise des colis, maintenance renforcée et confortement des alvéoles, reconstruction...)

Contrairement à un entreposage, un stockage peut aussi être fermé, pour assurer de manière passive le confinement des déchets et la protection à long terme des personnes et de l'environnement. Dans une recherche de flexibilité sur le pilotage du processus de stockage, les options proposées offrent la possibilité d'une progressivité de cette fermeture.

Pour ce faire, on a identifié plusieurs étapes successives à franchir, rendant le stockage de plus en plus passif. À chaque étape, une liberté de choix est offerte sur la conduite du processus, avec la possibilité d'attendre, ici encore sur des durées d'ordre séculaire, de passer à l'étape suivante, ou de revenir en arrière, jusqu'à un retrait des colis. En appui à la conduite du processus, il est techniquement possible d'observer le comportement et l'évolution du stockage au cours des étapes. Il s'agit tant d'identifier, le cas échéant, une nécessité d'action, par exemple un besoin de maintenance d'un ouvrage ou d'un équipement que de conforter les connaissances et les modèles scientifiques. Dans ce cadre, la possibilité de réaliser des ouvrages témoins a été examinée ; ceux-ci pourraient être plus densément instrumentés.

On a vérifié que le niveau de réversibilité du stockage, comparable à un entreposage dans les premières étapes, ne diminue que progressivement au fur et à mesure du franchissement des étapes, jusqu'au niveau le plus faible correspondant à la fermeture complète de l'installation. Néanmoins, au-

délà de cette fermeture, il reste techniquement possible de revenir dans les ouvrages de stockage et d'en retirer les déchets stockés.

Cette réversibilité ne présente pas d'antinomie avec la sûreté d'un stockage, opérationnelle ou à plus long terme. D'une part, la recherche de durabilité dans l'architecture pour favoriser la réversibilité n'apporte pas de risque nouveau et ne peut, a priori, qu'aller dans le sens de la sûreté. D'autre part, l'observation et la surveillance du stockage, associées à la mise en œuvre de la réversibilité, permettent de piloter le processus de stockage en toute connaissance de cause. On a aussi vérifié, pour les options techniques étudiées, que la possibilité d'allonger chaque étape du processus de stockage n'a pas d'impact significatif sur l'évolution à long terme de l'installation, dans la limite séculaire mentionnée précédemment.

La gestion réversible des colis et du processus de stockage implique, jusqu'à la fermeture complète, des décisions et des actions humaines : maintenance, observation et surveillance, travaux de fermeture. L'installation ne deviendra totalement passive qu'au-delà. Cette gestion active suppose une continuité du dispositif social et technique. Mais, elle rend d'autant moins vraisemblable un oubli progressif et un abandon de l'installation avant sa fermeture complète.

Un autre volet a été souligné par l'étude. Il s'agit de la réalisation progressive des installations de stockage, par modules successifs. Celle-ci autorise aussi une flexibilité dans le pilotage du développement d'un stockage. Elle permet aussi une certaine « réversibilité de la conception » du stockage : la définition des nouveaux ouvrages pourra être modifiée pour prendre en compte, notamment, l'expérience acquise par la mise en œuvre et l'observation des ouvrages précédents.

12.3 La sûreté dans l'architecture

L'architecture présentée a été conçue pour répondre aux fonctions de sûreté attendues d'un stockage. Cela concerne classiquement la sûreté opérationnelle, mais aussi, de manière plus spécifique à une installation de stockage, la sûreté après la fermeture. Cette dernière se fonde sur les objectifs exprimés par la règle fondamentale de sûreté n° III.2-f.

On notera, sans être exhaustif, l'architecture modulaire et en arborescence d'éléments borgnes, les dispositions prises en termes de dimensions d'ouvrages et de choix de matériaux pour limiter les perturbations (thermiques, mécaniques, chimiques en particulier), le rôle particulier des conteneurs des déchets de haute activité, les dispositifs construits lors des étapes de fermeture (remblais et scellements).

La robustesse des options présentées vis-à-vis des incertitudes de connaissances participe fortement à l'approche de la sûreté du stockage. La simplicité de ces options contribue à leur démontrabilité vis-à-vis des objectifs de sûreté.

Des dispositions ont aussi été introduites dans l'architecture pour renforcer la performance du stockage dans le cas de dysfonctionnements. Dans ce but, les installations souterraines ont été fractionnées en unités indépendantes. Des systèmes complémentaires et redondants ont été adoptés (par exemple en matière d'architecture et de scellements, vis-à-vis des possibilités de convection d'eau).

On rappelle que la prise en compte de la sûreté dans l'architecture d'un stockage a fait l'objet d'une démarche itérative, comme cela est recommandé par la règle fondamentale de sûreté. Ces itérations ont notamment donné lieu à des rendez-vous intermédiaires avec l'Autorité de sûreté. On notera aussi la revue internationale du dossier argile 2001 menée sous l'égide de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE, dont les principaux enseignements ont été pris en compte dans l'étude.

Enfin, on rappelle que l'architecture présentée a fait l'objet d'une étude de comportement et d'évolution à long terme et d'une évaluation de sûreté, présentées respectivement par les deux autres tomes du dossier argile 2005.

12.4 Perspectives

Les options présentées contribuent à établir du point de vue de l'ingénierie la faisabilité d'un stockage réversible et sûr. Néanmoins, elles ne doivent pas être considérées comme figées et définitives. En effet, elles ne visaient pas, à ce stade, à une optimisation technique ou économique.

Pour l'illustrer concrètement, on a identifié quelques perspectives d'évolution possible.

En matière d'architecture d'ensemble d'un stockage, une implantation au milieu de la couche a été retenue. Pour utiliser de manière optimale les caractéristiques du milieu, ce niveau d'implantation dans la couche pourrait être précisé avec la possibilité de le déplacer à une profondeur supérieure. Cela concerne le comportement géotechnique des ouvrages, qui varie selon le niveau d'implantation (résistance de la roche et contraintes mécaniques), ainsi que le rôle respectif des gardes d'argilite entre le stockage et les formations géologiques sus- et sous-jacente, vis-à-vis du confinement des radionucléides relâchés par les colis.

Un autre paramètre de l'architecture est l'adoption d'un principe d'arborescence d'éléments borgnes. Ce principe accroît la robustesse du comportement hydraulique à long terme du stockage. On pourrait en affiner l'application en renforçant la prise en compte de certains aspects opérationnels (accessibilité des ouvrages, ventilation, gestion des situations incidentelles).

Des hypothèses prudentes ont été adoptées en matière de dimensionnement géotechnique des ouvrages (galeries, alvéoles de stockage de déchets B en particulier). Ce dimensionnement pourrait être précisé - forme des ouvrages, définition des revêtements - pour l'ajuster aux caractéristiques géotechniques locales de la roche. Pour cela on pourrait s'appuyer sur l'observation dans la durée (quelques années) des galeries du laboratoire, permettant d'appréhender plus finement le comportement différé in situ de la roche.

En termes de stratégie de gestion des différents ouvrages, on a retenu de minimiser les charges de maintenance ; en pratique les ouvrages ont été conçus de manière analogue à des tunnels routiers, ouverts au public et dans lesquels les exigences de disponibilité sont particulièrement élevées. Selon les ouvrages, une stratégie plus nuancée pourrait être examinée, par exemple en recourant à un examen périodique et à une maintenance accrue, à l'image de pratiques minières.

Pour le dimensionnement des alvéoles de stockage de déchets C (et de combustibles usés), les critères thermiques retenus (températures limites dans le stockage) sont cohérents par rapport à ceux généralement considérés au plan international. De même, les concepts étudiés se sont fondés, de manière simple, sur la dissipation de la chaleur par conduction dans la roche, sans prise en compte de la ventilation. Une ventilation pourrait apporter une plus grande souplesse pour la conception thermique du stockage, mais son intérêt devrait être examiné en tenant compte des contraintes induites (architecture plus complexe).

Les dimensions des ouvrages ont été définies de manière raisonnable au regard des contraintes technologiques (creusement, transfert et mise en place des colis) ; cela a évité de complexifier la démonstration de faisabilité. Des optimisations pourraient être étudiées, permettant en particulier de réduire le volume total des excavations.

L'étude a montré l'intérêt d'alvéoles pour déchets C de très petite section transversale (en pratique proche de celle des colis de stockage) : cette option limite le volume de roche excavé, ainsi que les perturbations induites dans le milieu, et favorise la dissipation de la chaleur dans la roche.

Pour les combustibles usés, dans l'éventualité où il serait décidé de ne pas les retraiter, on a retenu l'interposition d'une barrière ouvragée à base d'argile gonflante entre les colis et la roche, en augmentant la section des alvéoles ; ce choix provient des incertitudes sur le comportement thermomécanique des argilites sur de longues durées (la décroissance thermique des combustibles usés est plus lente que celle des déchets C). Avec l'avancée des connaissances et les observations dans le laboratoire, l'intérêt d'une telle option (dans une optique de comportement à long terme) pourrait être revu.

Ces diverses perspectives d'amélioration de la conception ne remettent pas en cause la pertinence des options présentées pour le stockage et a fortiori les conclusions de l'étude en matière de faisabilité technique. Dans une logique d'optimisation, l'étude de telles perspectives pourrait s'effectuer en prolongement de la démarche itérative d'acquisition de données, de conception et d'étude de sûreté conduite jusqu'alors.

Références bibliographiques

- [1] Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs.
- [2] Règle Fondamentale de Sûreté RFS.III.2.f. relative aux objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage (10 juin 1991).
- [3] Andra (2005) Référentiel de connaissances et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C.RP.AHVL.04.0006.
- [4] Lyonnet P. (1997) La qualité, outils et méthodes. Ed. Techniques et documentation, Lavoisier, Paris, Chap. 5, pp 95-108.
- [5] Andra (2005) Analyse fonctionnelle externe d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.AHVL.00.140.
- [6] Andra (2005) Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ADS.04.0022.
- [7] Andra (2005) Analyse fonctionnelle interne d'un stockage en formation argileuse profonde, en phase post-fermeture - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.AHVL.01.031.
- [8] Wendling J. (2005) Le transitoire hydraulique d'un stockage : décharge, désaturation-resaturation, retour à un état d'équilibre hydraulique – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.117.
- [9] Andra (2005) Référentiel de comportement des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C.RP.ASCM.04.0017.
- [10] Bauer C. (2004) La charge thermique d'un stockage - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.118.
- [11] Andra (2005) Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques d'un stockage dans le Callovo-Oxfordien jusqu'à l'homme - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASTR.04.0032.
- [12] Altmann S., Coelho D. (2005) Le modèle d'écoulement et de transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien sain et perturbé - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.0022.
- [13] Su K., Barnichon J.D. (2005) Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés dans le temps - Site Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.109.
- [14] Commission nationale d'évaluation (1998) Réflexions sur la réversibilité des stockages.
- [15] Premier Ministre : Questions nucléaires – Relevé de conclusions – 09 décembre 1998.
- [16] AEN/OCDE (2001) Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level. Rapport NEA n° 03140, ISBN: 92-64-18471-6.

- [17] Callon M., Lascoumes P. & Barthe Y. (2001) *Agir dans un monde incertain, Essai sur la démocratie technique*, Ed. du Seuil, Paris.
- [18] Nations Unies, Déclaration de Rio, 13 juin 1992, Deuxième conférence des nations unies sur l'environnement et le développement.
- [19] Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement.
- [20] Commission européenne (2000) *Concerted Action on the Retrievability of long-lived Radioactive waste in deep underground repositories*. Rapport n° EUR 19145 EN.
- [21] National Research Council of the National Academies (2003) *One Step at a time, the staged development of geological repositories for High Level Waste*. Ed. The National Academies Press, Washington D.C. USA ; ISBN n° 0-309-08708-2.
- [22] Andra (2005) *Analyse fonctionnelle interne d'un stockage en formation argileuse profonde, en phase d'exploitation-observation - Site de Meuse/Haute-Marne*. Rapport Andra n° C.RP.AHVL.01.033.
- [23] Décret n° 81-512 du 12 mai 1981 relatif à la protection et au contrôle des matières nucléaires.
- [24] Arrêté du 8 juin 90 relatif à la teneur minimale en oxygène ainsi qu'aux teneurs limites en substances dangereuses admissibles dans l'atmosphère des travaux souterrains.
- [25] Décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.
- [26] Décret n° 2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.
- [27] Règle Fondamentale de Sûreté RFS.1.3.c relative au risque de criticité (18 octobre 1984).
- [28] Directive 96/29/EURATOM du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.
- [29] Code du travail – Livre 2 (Réglementation du travail) –Titre 3 (Hygiène, Sécurité et conditions de travail).
- [30] Articles L. 210-1 et suivants du Code de l'environnement.
- [31] Articles L. 220-1 et suivants du Code de l'environnement.
- [32] Léger B. et al. (1995) Dix ans de mesures géotechniques dans les marnes du tunnel de Chamoise, *Compte-rendu du 8ème Congrès International de Mécanique des Roches*, Tokyo, Japon, Ed. T. Fujii, volume 3, pp. 1309-1312.
- [33] Guerpillon Y., Allagnat D. (1986) Les mesures géotechniques effectuées lors de la construction du tunnel autoroutier de Chamoise, *Compte-rendu du Congrès International sur Grands Ouvrages en Souterrain*, Florence, Italie, volume 1, pp.1-10.
- [34] Rousset G. (1988) *Comportement mécanique des argiles profondes – application au stockage de déchets radioactifs*, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [35] Andra (2005) *Typologie des massifs granitiques français - Données thermiques (température initiale de la roche)*. Rapport Andra n° G.RP.ADPG.02.006.

- [36] Brulhet J. (2005) L'aléa sismique à long terme et son impact pour un stockage - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0102.
- [37] Andra (2005) Spécification technique de besoin d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.SP.AHVL.02.132.
- [38] Andra (2005) Scellements et remblais des galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.AHVL.04.0030.
- [39] Techniques de l'ingénieur – Génie nucléaire, ISSN 1762-875X, volume BN1.
- [40] Andra (2005) Synthèse des modèles de relâchement des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C.RP.ASCM.03.0045.
- [41] Andra (2005) Colis de stockage de déchets B. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0507.
- [42] RWMC (2002) Development of TRU Waste Disposal Package (FY 2001). Report n° 2001.03
- [43] RWMC (2004) Development of TRU Waste Disposal Package (FY2003). Report n° 2004.04
- [44] Nagra (2002) Project Opalinus Clay - Safety Report - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical report NTB 02-05.
- [45] Norme Européenne XP ENV 1992-1-1 (2002) Eurocode 2: Calcul des structures en béton, Comité Européen de Normalisation.
- [46] AFNOR (2002) Bétons et constituants du béton. Tome 1 : spécifications du béton et de ses constituants. Tome 2 : méthodes d'essais du béton. Recueil de normes. Bâtiment et travaux publics. 5e édition. AFNOR Ed.
- [47] Andra (2005) Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C.RP.ASCM.04.0015.
- [48] Bourbon X. (2005) L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base de béton : alvéoles de stockage de déchets B, appuis de scellements et de bouchons d'alvéoles, infrastructures des galeries - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.021.
- [49] SKB (2004) Status report, canister fabrication. Technical Report TR-04-23.
- [50] Andra (2005) Colis de stockage de déchets C. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.508.
- [51] JNC (2000) H12- Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW disposal in Japan. Second progress report on research and development for the geological disposal for HLW in Japan.
- [52] DOE (2003) Waste Package and Drip Shield Corrosion. Technical Basis Document N°6 (Yucca Mountain).
- [53] Crusset D. (2005) La corrosion des composants métalliques d'un stockage : les (sur)conteneurs de colis de déchets vitrifiés et de combustibles usés et les infrastructures métalliques - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.0046.

- [54] Andra (2005) Colis de stockage de combustibles usés en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0509.
- [55] Andra (2005) Synthèse des études de sûreté-criticité d'un stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.NT.AMES.04.0041.
- [56] Andra (2005) Evaluation de sûreté du stockage géologique - Dossier 2005 argile. Rapport Andra n° C.RP.ADSQ.04.0022.
- [57] Barnichon J.D., Su K. (2005) Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets B dans le temps - Site Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASMG.03.0110.
- [58] Jacquot E., Michau N. (2005) La perturbation alcaline liée à un stockage : les argilites du Callovo-Oxfordien en champ proche et les composants à base d'argile gonflante - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.069.
- [59] Hingant P., Guerpillon Y (1986) La construction du tunnel autoroutier de Chamoise, Tunnels et Ouvrages souterrains, N°77, pp. 206-221.
- [60] JNC (2000) Progress report on disposal concept for TRU waste in Japan, TRU coordination office, March, 2000. Rapports JNC n° TY1400 2000-02 et n° TRU TR-2000-02.
- [61] Andra (2005) Conception, construction et fermeture d'alvéoles de stockage de déchets B en formation argileuse profonde – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0510.
- [62] Talandier J. (2005) La production et le transfert de gaz dans un stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien - Lien avec le transitoire hydraulique - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.0042.
- [63] ONDRAF/NIRAS (2001) Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2 (SAFIR 2). Rapport ONDRAF n° NIROND 2001-06 E.
- [64] ONDRAF/NIRAS (2004) Multi-criteria analysis on the selection of a reference EBS design for vitrified high level waste. Rapport ONDRAF n° NIROND 2004-03.
- [65] Andra (2005) Conception, construction et fermeture d'alvéoles de stockage de déchets vitrifiés ou de combustibles usés en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0511.
- [66] Andra (2005) L'évolution phénoménologique des galeries d'un stockage et comportement des radionucléides dans les galeries - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.04.0014.
- [67] AECL (2005) Tunnel sealing experiment five year report. Rapport Andra n° G.RP.DPG.05.0002.
- [68] SKB (1999) Deep repository for spent nuclear fuel, SR 97 – Post closure safety. Technical Report TR-99-06.
- [69] DOE (2002) Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration - Science and Engineering Report (Yucca Mountain). Rapport DOE n° DOE/RW-0539-1.
- [70] SKB (1993) Clay Technology - Laboratory investigations of highly compacted bentonite blocks for buffer material. Rapport SKB n° PR 44-93-009.
- [71] Michau N. (2005) L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base d'argile gonflante : alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés et scellements

- de galeries et de puits - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.043.
- [72] SKB (1999) Clay Technology - Compaction of full size blocks of bentonite for the KBS-3 concept - Initial tests for evaluating the technique. Rapport SKB n° R-99-66.
- [73] SKB (1994) Clay Technology - Heat conductivity of buffer materials. Rapport SKB n° TR 94-29.
- [74] Kawakami S., Kanno T., Jintoku T., Ueda H., Kimoto T. (2001) Large-scale manufacturing test of monolithic buffer material for geological disposal of HLW, 9th International Conference on Nuclear Engineering, Nice.
- [75] Giffaut E, Buschaert S. (2005) La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimique au sein du Callovo-Oxfordien sain et perturbé - Site Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.099.
- [76] Elion P. (2005) Le modèle géologique du Callovo-Oxfordien à l'état initial - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0101.
- [77] DOE (2004) Compliance Recertification Application. Rapport DOE/WIPP 04-3231.
- [78] Su K. (2005) Effets d'un stockage sur le comportement mécanique à grande échelle de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations géologiques encaissantes - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.04.0046.
- [79] Pepin G, Vialay B. (2004) L'organisation des écoulements dans et autour d'un stockage après resaturation et retour à un état d'équilibre hydraulique - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ACSS.03.0111.
- [80] Andra (2005) Estimation analytique de l'influence de la position des puits sur les écoulements à l'échelle du stockage, après retour à l'équilibre hydraulique - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.05.0001.
- [81] Andra (2005) Transfert des colis (déchets B, C et Combustibles Usés) et mise en alvéole de stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.512.
- [82] Andra (2005) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) – Phase d'exploitation d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.077.
- [83] Andra (2005) Analyse des niveaux de réversibilité d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.AHVL.04.0028.
- [84] Andra (2005) Le transitoire redox dans un stockage et dans le Callovo-Oxfordien en champ proche - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.127.
- [85] Barnichon J.D., Su K. (2005) Le comportement mécanique des scellements de galeries dans le temps - Site de Meuse/Haute- Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0111.
- [86] Barnichon J.D., Su K. (2005) Le comportement mécanique des scellements de puits dans le temps - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0112.
- [87] Andra (2005) Observation et surveillance d'un stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.RP.AHVL.04.0029.

- [88] IAEA (2001) Monitoring of geological repositories for high-level radioactive waste. IAEA-TECDOC-1208. IAEA, Vienna. ISSN-1011-4289.
- [89] AEN/OCDE (2005) The Role of Monitoring in a Safety Case, Topical Session Proceedings of the 6th IGSC Meeting, Issy-Les-Moulineaux. Rapport n° NEA/RWM/IGSC(2005)3.
- [90] Commission européenne (2004) Thematic network on the role of monitoring in a phased approach to geological disposal of radioactive waste. Nuclear Science and Technology. Rapport n° EUR 21025.
- [91] IAEA (2004) Geologic disposal of radioactive waste, Draft Safety Requirements. IAEA Safety Standard Series n° DS 154.
- [92] Cooper, R. B., J. W. Barnard, G. A. Bird, M. Gacoyne, B. M. Ikeda, E. T. Kozak, G. S. Lodha, P. M. Thompson, A. W. L. Wan, D. M. Wuschke (1997) Monitoring methods for nuclear fuel waste storage. Rapport AECL n° 11643, ISBN : 0660-16993-Z.
- [93] SKB (2004) Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel. Rapport SKB R-04-13.
- [94] EKRA (2000) Modèles de gestion de déchets radioactifs. Rapport final pour le compte du Département de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC, Berne).
- [95] Allagnat, D. (2004) La méthode observationnelle: réexaminer le dimensionnement d'un ouvrage géotechnique pendant les travaux. Travaux n° 807, éditions Science et Industrie S.A., Paris.
- [96] Piraud J. et al (1998) L'organisation de l'auscultation des tunnels (Recommandations AFTES), Tunnels et Ouvrages Souterrains, n° 149, Septembre/Octobre 1998.
- [97] CIGB (Commission Internationale des Grands Barrages) (1988) Auscultation des barrages - considérations générales, bulletin n° 60.
- [98] Ramondec Ph., Billion A., Thuaud C. (2001) Nouvelles technologies de géométrie [des tunnels], 1ère conférence internationale Albert Caquot « Modélisation et simulation en génie civil : de la pratique à la théorie », Paris.
- [99] Circulaire n° 70/15 du 14 août 1970 modifiée par circulaire n° TE/8562 du 29 septembre 1983 relative à l'inspection et la surveillance des barrages intéressant la Sécurité publique.
- [100] Beaujoint W. (1966) Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'EDF- problèmes anciens et solutions nouvelles, Colloque Technique CFGB, Paris, pp. 31-36.
- [101] CIGB (Commission Internationale des Grands Barrages) (1995) Ruptures de barrages – Analyse statistique, bulletin n°99.
- [102] Commission européenne (2003) Clipex - Clay instrumentation programme for the extension of an underground research laboratory. Nuclear Science and Technology. Rapport n° EUR 20619.
- [103] SKB (2003) Aspö hard rock laboratory - Prototype repository - sensors data report. International progress report n° IPR-03-46.

- [104] Le Floch S. (2001) Etude de la diffusion Brillouin stimulée dans les fibres optiques monomodes standard. Application aux capteurs de température et de pression, Université de Bretagne Occidentale.
- [105] Tardieu B., Ozanam O. (1997) Le modèle accompagnateur de projet – conception et suivi des grandes infrastructures, Revue Française de Génie Civil, Volume 1, numéro hors série, Ed. Hermès.
- [106] Andra (2005) Récupération des colis de stockage de déchets B et C et de combustibles usés, avant et après scellement d'alvéoles de stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0506.
- [107] Andra (2005) Sûreté opérationnelle : analyse de risque dans un stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0514.
- [108] Règle Fondamentale de Sûreté n° I.4.a relative à la protection contre l'incendie (28 février 1985).
- [109] Règle Fondamentale de Sûreté n° II.2 relative à la conception et exploitation des systèmes de ventilation dans les installations de base autres que les réacteurs nucléaires (20 décembre 1991).
- [110] Arrêté du 1er juin 2001 modifié, relatif au transport international des marchandises dangereuses par route, dit « arrêté ADR ».
- [111] DBE Technology (2001) Study related to the design rational of the shafts of the German and French geological repositories. Rapport Andra n° C.RP.0DBE.01.001.
- [112] Règle Fondamentale de Sûreté n° 2001-01 relative à la détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface.
- [113] Règle Fondamentale de Sûreté n° I.1.a relative à la prise en compte des risques liés aux chutes d'avion (7 octobre 1992).
- [114] Wendell D. Weart, Norbert T. Rempe and Dennis W. Powers (1998) Geotimes, October 1998 : The Waste Isolation Pilot Plant (WIPP).
- [115] Oresund Safety Advisers AB (ØSA) (2002) Fire risk analysis of underground transports to the deep repository for spent fuel. Rapport n° 01191/FN(établi pour The Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co).
- [116] Lacroix D. (2003) Résistance au feu des tunnels routiers. Centre d'Etudes des Tunnels, Tunnels et ouvrages souterrains n° 179, septembre/octobre 2003.
- [117] U.S. Nuclear Regulatory Commission (2001) An analysis of a spent fuel transportation cask under severe fire accident conditions - Christopher S. Bajwa.
- [118] Scetauroute (2005) Comportement à long terme des argilites et pérennité de l'instrumentation du tunnel de Chamoise. Rapport Andra n° C.RP.FSTE.05.0063.
- [119] RWMC (2004) Research on monitoring related to geological disposal : Status and technical possibilities. Rapport RWMC n° RWMC-TRJ-04003.