Bilan des études et recherches sur l'entreposage

Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue

DÉCEMBRE 2012

ANDRA
La maîtrise des déchets radioactifs

Bilan des études et recherches sur l'entreposage - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue

SOMMAIRE

Tables des illustrations 8

1. Démarche d'étude et de recherche sur l'entreposage des déchets HA et MAVL 17

1.1 La complémentarité entre le stockage réversible et l'entreposage 19
1.2 Les enseignements des recherches du CEA sur l'entreposage de longue durée 20
1.3 Le cadre des études et recherches menées depuis 2006 22
1.4 Le contenu scientifique et technique des études et recherches 24
1.4.1 Analyse des besoins en entreposage 24
1.4.2 Recherche d'options techniques favorisant la complémentarité avec le stockage 25
1.4.3 Extension ou création d'installations d'entreposage 26
1.5 Introduction de la structure générale du bilan des études et recherches 27

2. Les déchets HA et MAVL 29

2.1 Colis de déchets HA 31
2.1.1 Déchets HA vitrifiés issus de productions anciennes (familles F1-4-01, F1-5-01, F1-3-02) 31
2.1.2 Productions actuelles et futures de déchets HA vitrifiés (famille F1-3-01) 33
2.1.3 Combustibles usés EL4 (famille F1-5-02) 34
2.1.4 Déchets HA divers (familles F1-3-03, F1-3-04, F1-3-05) 34
2.2 Colis de déchets MAVL 34
2.2.1 Déchets MAVL conditionnés sur le site de La Hague (Areva) 35
2.2.2 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Marcoule (CEA) 39
2.2.3 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Cadarache (CEA) 42
2.2.4 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Valduc (CEA) 47
2.2.5 Déchets MAVL d'exploitation et de déconstruction des réacteurs électronucléaires (EDF) 47
2.3 Volumes en 2030 (IN 2012) 48
2.3.1 Colis de déchets HA 48
2.3.2 Colis de déchets MAVL 48

3. Analyse des capacités d'entreposage 51

3.1 Capacités existantes d'entreposage de colis de déchets HA-MAVL 52
3.1.1 Entreposage des colis de déchets HA 53
3.1.2 Entreposage des colis de déchets MAVL 57
3.1.3 Bilan des capacités existantes 63
3.2 L'expérience industrielle de l'entreposage de colis de déchets HA ou MAVL en France 66
3.2.1 Entreposage sous eau de combustibles usés 66
3.2.2 Entreposage à sec de colis de déchets HA 67
3.2.3 Entreposage à sec de colis de déchets MAVL 77
3.3 L'expérience de l'entreposage à l'étranger 88
3.3.1 Principales installations d'entreposage dans les autres pays 88
3.3.2 Les installations étrangères d'entreposage à sec comparables à l'expérience industrielle française 91
3.3.3 Procédés d'entreposage à sec peu pratiqués en France 98

4. Le stockage réversible en formation géologique profonde 107

4.1 Fonctions de sûreté du stockage 108

4.2 La réversibilité du stockage 110

4.3 Colis de stockage 112

4.3.1 Déchets HA 113
4.3.2 Déchets MAVL 114

4.4 Architecture de stockage 118

4.4.1 Alvéoles de stockage des déchets HA 118
4.4.2 Alvéoles de stockage des déchets MAVL 120
4.4.3 Installations de surface 121

4.5 Première esquisse de chronique de stockage présentée en 2009, simulations exploratoires 122

4.5.1 Scénario exploratoire de stockage des colis HA (2009) 126
4.5.2 Scénario exploratoire de stockage des colis MAVL (2009) 128
4.5.3 Simulations paramétriques complémentaires 132

4.6 Chroniques de mise en stockage du programme industriel de gestion des déchets (2012) 136

5. Recensement des besoins en entreposage 139

5.1 Besoins en capacités supplémentaires d'entreposage de déchets HA 141

5.1.1 Déchets HA moyennement ou faiblement exothermiques 141
5.1.2 Déchets HA fortement exothermiques 142

5.2 Besoins en capacités supplémentaires d'entreposage de déchets MAVL 150

5.2.1 Déchets MAVL conditionnés sur le site de La Hague (Areva) 150
5.2.2 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Marcoule (CEA) 153
5.2.3 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Cadarache (CEA) 158
5.2.4 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Valduc (CEA) 160
5.2.5 Déchets MAVL d'exploitation et de déconstruction des réacteurs électronucléaires (EDF) 160
5.2.6 Bilan des besoins en nouvelles capacités d'entreposage pour les colis de déchets MAVL 161

5.3 Fonctionnalités de l'entreposage et objectifs de sûreté 162

5.3.1 Fonctions de service 162
5.3.2 Objectifs, fonctions et exigences de sûreté 164

6. Options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets HA 173

6.1 Introduction des études 2007-2009 d'options techniques d'entreposage de colis de déchets HA 175

6.1.1 Recherche de solutions techniques 175
6.1.2 Etudes de faisabilité 176

6.2 Principales questions techniques 177

6.2.1 Manutention et positionnement des colis HA 177
6.2.2 Evacuation de la chaleur 182
6.2.3 Architectures d'entreposage des déchets HA 186
6.2.4 Les possibilités de surveillance 194

6.3 Etude de faisabilité d'une architecture en puits verticaux avec regroupement des colis en casiers 196

6.3.1 Architecture et génie civil 196
6.3.2 Manutention des colis 200
6.3.3 Refroidissement des fosses 203

6.4 Etude de faisabilité d'un bâtiment multi-étagé 205
6.4.1 Architecture et génie civil 205
6.4.2 Manutention des colis 208
6.4.3 Refroidissement des colis 212
6.5 Etude de faisabilité de casemates modulaires en béton sur radier 215
6.5.1 Architecture 215
6.5.2 Manutention 219
6.5.3 Refroidissement des paniers et de la casemate 220
6.6 Etude de faisabilité d'un d'entrepôt à faible profondeur construit à ciel ouvert 223
6.6.1 Architecture et génie civil 224
6.6.2 Manutention des colis 229
6.6.3 Ventilation 231
6.7 Etude de faisabilité d'un entrepôt en galeries souterraines 234
6.7.1 Architecture et mode de réalisation 235
6.7.2 Etude du transfert des colis par puits forés 239
6.7.3 Manutention des colis de déchets en souterrain 241
6.7.4 Ventilation 242
6.8 Bilan des études 2007_2009, introduction des études effectuées à partir de 2011 244
6.8.1 L'évaluation des concepts issus des études de faisabilité (2009) 244
6.8.2 Les principales caractéristiques des trois concepts retenus pour la deuxième phase 247
6.8.3 Axes d'optimisation des trois concepts explorés dans le cadre de la seconde phase, données d'entrée 248
6.9 Les évolutions possibles du concept HA1 dans une optique d'optimisation (entreposage en puits verticaux et regroupement des colis en casiers) 249
6.9.1 L'empilement des colis et le refroidissement en puits 249
6.9.2 La manutention des colis HA et des casiers dans un hall assurant la radioprotection 251
6.9.3 L'amélioration de la robustesse de l'installation face aux agressions internes et externes 251
6.10 Les évolutions possibles du concept HA2 dans une optique d'optimisation (entreposage sur dalle et ventilation mécanique horizontale) 253
6.10.1 L'entreposage modulaire et la chaîne cinématique de manutention 253
6.10.2 Le regroupement des colis dans des casiers ajourés et la canalisation de la ventilation 255
6.10.3 L'amélioration de la robustesse de l'installation face aux agressions internes et externes 256
6.11 Les évolutions possibles du concept HA3 dans une optique d'optimisation (entreposage en casemates modulaires avec ventilation naturelle) 256

7. Options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets MAVL 259

7.1 Introduction des études 2007-2009 d'options techniques d'entreposage de colis de déchets MAVL 260
7.2 Principales questions techniques 262
7.2.1 La recherche de polyvalence et la capacité d'un entrepôt MAVL 262
7.2.2 Manutention et entreposage unitaire ou groupé des colis MAVL 263
7.2.3 Architectures d'entreposage des déchets MAVL 266
7.2.4 Les possibilités de surveillance 271
7.2.5 Gestion des gaz générés par les colis de déchets MAVL 272
7.2.6 Ventilation d'installations d'entreposage 273

7.3 Etude de faisabilité d'un entrepôt avec rayonnages 274
7.3.1 Architecture et génie civil 274
7.3.2 Manutention des colis 277
7.3.3 Ventilation 278
7.4 Etude de faisabilité d'un entrepôt avec longrines exploité par navettes 280
7.4.1 Architecture et génie civil 280
7.4.2 Manutention 281
7.5 Etude de faisabilité d'un entrepôt à faible profondeur 283
7.5.1 Architecture et génie civil 283
7.5.2 Manutention 286
7.5.3 Ventilation 287
7.6 Bilan des études 2007_2009, axes d'optimisation 288
7.6.1 L'évaluation des concepts MAVL issus des études de faisabilité 288
7.6.2 Axes d'optimisation explorés dans le cadre de la seconde phase, données d'entrée 289
7.7 Les évolutions possibles du concept d'entreposage MAVL dans une optique d'optimisation 290
7.7.1 Le cloisonnement en alvéoles ventilés 291
7.7.2 La manutention par navette plate équipée d'une fourche télescopique 292
7.7.3 L'amélioration de la polyvalence de l'entreposage 293
7.7.4 L'amélioration des possibilités de surveillance 293

8. Analyse phénoménologique de l'entreposage, optimisation du choix des matériaux et des dispositions constructives 295
8.1 Données d'entrée de l'analyse phénoménologique 296
8.1.1 Arborescence matérielle de l'entreposage 296
8.1.2 Chronogramme d'exploitation 297
8.1.3 Les colis de déchets analysés 298
8.2 La conceptualisation phénoménologique d'une installation d'entreposage 299
8.2.1 Les deux types de sollicitations phénoménologiques 299
8.2.2 Les sollicitations externes 299
8.2.3 Les sollicitations internes 300
8.2.4 Dispositions de conception favorables à la limitation des sollicitations phénoménologiques, donc à la durabilité de l'entreposage 301
8.2.5 Les ouvrages, les composants (hors colis) et les matériaux majeurs de l'entreposage vus sous l'angle des sollicitations et de la durabilité 304
8.2.6 L'indépendance phénoménologique entre les entreposages HA et MAVL 305
8.3 Les grands processus 305
8.3.1 Découplage phénoménologique entre l'environnement externe et l'environnement interne 306
8.3.2 Processus thermique et hydraulique 306
8.3.3 Processus chimiques 310
8.3.4 Processus radiologiques 311
8.3.5 Relâchement et transfert de radionucléides en solution et gazeux 312
8.4 Principaux éléments déterminant l'évolution phénoménologique des entreposages 313

9. Application des recherches à l'extension de l'entreposage des déchets HA vitrifiés sur le site de la Hague 315
9.1 Les structures en béton armé 317
9.1.1 Le comportement phénoménologique du génie civil 317
9.1.2 Les spécifications des bétons : formulation et choix des armatures. 317

9.1.3 Les dispositions constructives 318

9.2 La thermo-aéraulique et les circuits de ventilation 318

9.2.1 Le comportement phénoménologique des structures métalliques 318
9.2.2 Le choix des aciers inoxydables 318
9.2.3 Les dispositions constructives 319

9.3 L'amélioration de la surveillance et du monitoring 319

9.3.1 La température 319
9.3.2 La déformation de la structure en béton armé 319
9.3.3 Le vieillissement des matériaux 321

10. Conclusions, perspectives 323

10.1 Besoins futurs en entreposage 324

10.2 Rappel des principaux résultats des études et recherches 326

10.3 Perspectives 327

10.3.1 Optimisation des scénarios de gestion entreposage-transport-stockage 327
10.3.2 Accompagnement de l'extension d'installations existantes ou de la création de nouvelles installations. 327
10.3.3 Support scientifique 328
10.3.4 Etudes prospectives sur l'entreposage en soutien à la réversibilité du stockage 328

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 2.1-1	Colis HA « PIVER »	32
Figure 2.1-2	Colis HA « AVM »	32
Figure 2.1-3	Colis HA « CSD-V » (La Hague)	33
Figure 2.1-4	Décroissance dans le temps de la puissance thermique des CSD-V produits par l'usine de La Hague	34
Figure 2.2-1	Conteneur de déchets de structure ou technologiques compactés (CSD-C)	36
Figure 2.2-2	Décroissance de la puissance thermique des colis CSD-C dans le temps	36
Figure 2.2-3	Conteneur en béton fibré ou en amiante-ciment pour déchets technologiques	37
Figure 2.2-4	Conteneur de boues bitumées du site de La Hague (STE2 et STE3)	38
Figure 2.2-5	Fût de 380 litres, dit « EIP »	40
Figure 2.2-6	Colis de boues bitumées reconditionné en sur-fût inox de 380 litres (à gauche), colis de boues bitumées en conteneur inox de 230 l (à droite)	42
Figure 2.2-7	Fûts en acier non allié de 870 litres pour déchets faiblement irradiants	43
Figure 2.2-8	Fûts de 500 litres en acier non allié	44
Figure 2.2-9	Coques béton de 500 litres contenant un fût de déchets	45
Figure 2.2-10	Conteneur béton de 1 000 litres (reconditionnée en conteneur métallique à droite)	46
Figure 2.2-11	Conteneur béton de 1 800 litres (reconditionnée en conteneur en acier à droite)	46
Figure 2.2-12	Blocs sources	47
Figure 3.1-1	E-EV-SE à La Hague [source Areva]	54
Figure 3.1-2	Comparaison de la production de colis de déchets vitrifiés Cet de la capacité des installations d'entreposage R7, T7, E-EV-SE et EEVLH (en cours de construction) sur le site de La Hague.	54
Figure 3.1-3	Comparaison du nombre de colis de déchets et d'effluents vitrifiés de Marcoule et de déchets d'exploitation de l'Atelier de vitrification de Marcoule produits, expédiés vers Cigéo, et de la capacité d'entreposage.	55
Figure 3.1-4	L'atelier pilote de Marcoule (APM, source CEA)	56
Figure 3.1-5	CASCAD à Cadarache (source CEA)	56
Figure 3.1-6	ECC à La Hague (source Areva)	57
Figure 3.1-7	Comparaison du nombre de colis CSD-C produits et expédiés vers Cigéo et de la capacité d'entreposage d'ECC	57
Figure 3.1-8	Comparaison de la production de colis de coques et embouts, de déchets solides d'exploitation et de déchets pulvérulents cimentés, et de la capacité d'entreposage des déchets solides EDS à La Hague	58
Figure 3.1-9	Comparaison de la production de colis d'enrobés bitumineux, de boues STE2 et de déchets technologiques contaminés en émetteurs alpha sur le site de La Hague et de la capacité d'entreposage des bâtiments S et ES	59
Figure 3.1-10	Casemate n° 14 de Marcoule (à gauche) et EIP (à droite) [source CEA]	60
Figure 3.1-11	Bâtiments n° 374 et 375 de CEDRA à Cadarache (source CEA)	61
Figure 3.1-12	Comparaison de la quantité de déchets MAVL faiblement irradiants de Cadarache représentée en volume (m3) de colis équivalent conditionné et de la capacité de CEDRA FI	62
Figure 3.1-13	Comparaison de la quantité de déchets MAVL moyennement irradiants de Cadarache représentée en volume (m3) de colis équivalent conditionnés et de la capacité de CEDRA MI	62
Figure 3.2-1	Entreposage sous eau de combustibles usés (source Areva)	67

Figure 3.2-2	Hall de manutention de l'entrepôt de l'AVM avec ses équipements (source Areva)	68
Figure 3.2-3	Entreposage R7 à La Hague : coupe schématique des puits d'entreposage (à gauche), hall de manutention au-dessus des puits (à droite) [source Areva]	70
Figure 3.2-4	Entreposage E-EV-SE de colis CSD-V à La Hague : coupe schématique (à gauche), hall de manutention (à droite) [source Areva]	72
Figure 3.2-5	Circulation de l'air de ventilation dans le double circuit des puits d'entreposage de l'installation E-EV-SE et soufflets compensateurs de dilatation en pied de puits d'entreposage (source Areva)	73
Figure 3.2-6	CASCAD : vue générale et coupe de principe (source CEA)	76
Figure 3.2-7	Cellule de déchargement et de manutention de CASCAD (source CEA)	76
Figure 3.2-8	Coupe verticale de l'ECC (source Areva)	77
Figure 3.2-9	Plan masse de l'ECC, manutention des colis par chariots automoteurs (source Areva)	78
Figure 3.2-10	Principe de ventilation (source Areva)	79
Figure 3.2-11	Schéma de ventilation (source Areva)	80
Figure 3.2-12	Colis témoins (source Areva)	81
Figure 3.2-13	Vue générale du bâtiment 376, hall de manutention (source CEA)	82
Figure 3.2-14	Vue générale d'un bâtiment d'entreposage de déchets FI de CEDRA (source CEA)	83
Figure 3.2-15	Vue intérieure de l'entreposage intermédiaire polyvalent EIP et fût en acier inoxydable de 380 litres (source CEA)	84
Figure 3.2-16	Hall d'entreposage de STE3	87
Figure 3.2-17	EDS, dépose du colis à la verticale sur le basculeur (source Areva)	88
Figure 3.2-18	EDS, tampon pour reprise des colis à l'horizontale et transfert des colis en entreposage (source Areva)	88
Figure 3.3-1	Le CLAB (Suède) : entreposage à faible profondeur de combustibles usés sous eau (source SKB)	91
Figure 3.3-2	Installation d'entreposage de colis de déchets HA vitrifiés de Rokkasho-Mura (Japon) [source Areva]	92
Figure 3.3-3	Hall de manutention de l'installation d'entreposage de déchets HA vitrifiés de Sellafield (source Sellafield ltd)	93
Figure 3.3-4	Le bâtiment 129 du Centre de Dessel pour l'entreposage de déchets HA (source Ondraf)	93
Figure 3.3-5	Installation d'entreposage de colis de déchets HA vitrifiés de Savannah River, au centre, bâtiment GWSB n° 2, à droite, engin de manutention des colis sur pneus (source US-DOE)	93
Figure 3.3-6	Installation d'entreposage de colis de déchets HA vitrifiés (SSSF) de Tarapur (Inde) [source Bhabha Atomic Research Centre]	94
Figure 3.3-7	Le bâtiment 127 du Centre de Dessel, pour l'entreposage de déchets de moyenne activité (source Ondraf)	94
Figure 3.3-8	L'entrepôt hongrois de combustibles usés : en haut à droite, hall de manutention durant une opération de contrôle ; en bas à gauche, puits d'entreposage sous la dalle de radioprotection ; en bas à droite, têtes des puits d'entreposage (source Puram)	95
Figure 3.3-9	Le bâtiment 136 du Centre de Dessel (source Ondraf)	95
Figure 3.3-10	Habog : à gauche, vue extérieure du bâtiment ; à droite, section verticale (source COVRA)	97
Figure 3.3-11	Vues intérieures de Habog : à gauche, hall de manutention des déchets HA, au centre, introduction d'un colis HA dans un puits d'entreposage, à droite, exemple de diversité des types de colis accueillis	98
Figure 3.3-12	Concept d'entrepôt WTI/GNS (source BfS)	99
Figure 3.3-13	Concept d'entrepôt STEAG pour combustibles usés ; à gauche, photographies du bâtiment d'entreposage du site de Lingen (source BfS)	99
Figure 3.3-14	Plan masse de l'entrepôt à faible profondeur de Neckarwestheim (source BfS)	100

Figure 3.3-15	Entreposage d'appoint à la centrale de Neckarwestheim	100
Figure 3.3-16	Entreposage à sec en Suisse (ZWILAG) ; à droite, divers emballages de la famille TN24 utilisés par ZWILAG (source Areva)	101
Figure 3.3-17	Entreposage à sec de combustibles usés sur le site de centrale de Trillo (Espagne)	102
Figure 3.3-18	Entreposage à sec de combustibles usés en modules « NUHOMS® » (source Areva)	102
Figure 3.3-19	Conteneurs d'entreposage développés par OPG (DSCs) [source EACL]	104
Figure 3.3-20	Conteneurs d'entreposage en béton développés par EACL et utilisés sur différents sites canadiens ; à droite, panier d'assemblages Candu avant introduction dans un conteneur (source EACL)	104
Figure 3.3-21	Conteneurs d'entreposage en béton EACL, à gauche sur le site de Whiteshell (WL), à droite sur le site de Wolsong (source EACL)	104
Figure 3.3-22	Module d'entreposage EACL « Macstor » : à gauche, section verticale et principe de fonctionnement ; à droite, modules exploités sur le site de Gentilly 2 (source EACL)	105
Figure 3.3-23	Conteneurs d'entreposage en béton pour combustibles Candu sur le site de Embalse [source Comision nacional de energia atomica – Argentina]	105
Figure 4.2-1	Echelle internationale de récupérabilité (AEN)	111
Figure 4.3-1	Colis de stockage pour déchets HA vitrifiés des familles F1-3-01 (CSD-V) et F1-3-02 (CSD-U), à gauche, et de la famille F1-5-01, à droite	114
Figure 4.3-2	Colis de stockage de combustibles usés EL4 (F1-5-02)	114
Figure 4.3-3	Démonstrateur de conteneur de stockage présenté au public à l'Espace technologique du Centre de Meuse/Haute-Marne	115
Figure 4.3-4	Exemple de conteneur de stockage pour CSD-C (famille F2-3-02)	115
Figure 4.4-1	Alvéole de stockage de déchets HA (à gauche, équipements de mise en alvéole)	119
Figure 4.4-2	Influence de la durée d'entreposage sur le volume excavé par CSD-V [ratio par rapport à une durée d'entreposage de 60 ans]	120
Figure 4.4-3	Principe de mise en alvéole des colis MAVL	121
Figure 4.4-4	Schéma de principe des installations de surface et souterraine	121
Figure 4.5-1	Simulation exploratoire du flux journalier de la mise en alvéole des colis de stockage des déchets HA et MAVL, pour une mise en stockage des déchets HA fortement exothermiques au plus tôt (en nombre de colis de stockage par jour) [2009]	123
Figure 4.5-2	Simulation exploratoire des volumes de colis de stockage des déchets HA et MAVL mis en alvéole : en haut, volume mis en alvéole chaque année ; en bas, volume cumulé [2009]	124
Figure 4.5-3	Simulation exploratoire du flux de mise en alvéole des colis de stockage, pour une mise en stockage des déchets HA fortement exothermiques à un âge de 92 à 100 ans [2009]	125
Figure 4.5-4	Simulation exploratoire du nombre de types différents d'alvéoles de stockage exploités simultanément pour accueillir les déchets HA et MAVL produits jusqu'en 2030 [2009]	125
Figure 4.5-5	Simulation exploratoire de chroniques de mise en stockage de colis de déchets HA [2009]	127
Figure 4.5-6	Esquisse de chronique de mise en stockage des colis de déchets MAVL présentée en 2009	133
Figure 4.5-7	Variante de chronique de mise en stockage des colis de déchets MAVL étudiée en 2009	134
Figure 4.5-8	Simulation variante : flux journalier de colis de stockage MAVL (en haut) et nombre de types d'alvéoles exploités simultanément (en bas) dans l'hypothèse d'une CDE de S, ES et EDS en 2040 [2009]	135
Figure 4.5-9	Simulation variante : hypothèse d'une CDE de S, ES et EDS en 2050 [2009]	135
Figure 4.6-1	Chronique de référence de mise en stockage sur la période 2025 - 2050 (PIGD) : nombre de colis de déchets primaires réceptionnés par an sur Cigéo	137

Figure 4.6-2	Chronique optionnelle de mise en stockage sur la période 2025 - 2050 (PIGD)	138
Figure 4.6-3	Chronique de mise en stockage de colis de déchets HA vitrifiés fortement exothermiques	138
Figure 5.1-1	Scénario d'entreposage avec report de la CDE de R7, T7 et E-EV-SE et mise en stockage au plus tôt : en haut, capacités d'entreposage existantes et à créer et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)	144
Figure 5.1-2	Scénario d'entreposage avec une capacité supplémentaire de 1 940 m³ : en haut, capacités d'entreposage et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)	145
Figure 5.1-3	Scénario d'entreposage avec une capacité supplémentaire de 1 940 m³ et une durabilité séculaire des capacités à créer : en haut, capacités d'entreposage et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)	146
Figure 5.1-4	Scénario d'entreposage avec une capacité supplémentaire de 1 940 m³, une durabilité séculaire des capacités à créer et un prolongement de l'exploitation de E-EV-LH : en haut, capacités d'entreposage et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)	147
Figure 5.1-5	Evolution du volume de colis primaires de la famille F1-3-01 âgés respectivement de moins et de plus de 35 ans (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)	148
Figure 5.2-1	Illustration du désentreposage des CSD-C sur la base du PIGD (2012) : nombre cumulé de colis primaires de déchets à gauche ; flux annuel de colis primaires à droite	151
Figure 5.2-2	Illustration du désentreposage dans EDS des colis de déchets solides sur la base du PIGD (2012) : nombre cumulé de colis primaires de déchets à gauche ; flux annuel de colis primaires à droite	153
Figure 5.2-3	Illustration du désentreposage des colis de déchets MAVL faiblement irradiants (CEDRA FI), sur la base du PIGD (2012) : nombre cumulé de colis primaires de déchets à gauche ; flux annuel de colis primaires à droite	159
Figure 5.2-4	Vues de principe du projet ICEDA et photographie du chantier au 21 décembre 2011 (source EDF)	161
Figure 6.2-1	Colis empilés verticalement : en puits à gauche, en conteneur à droite	179
Figure 6.2-2	Colis posés verticalement sur un plancher de bâtiment	179
Figure 6.2-3	Colis posés verticalement dans une galerie	179
Figure 6.2-4	Colis posé horizontalement	179
Figure 6.2-5	Casier d'entreposage vertical (1 étage de 6 colis primaires)	180
Figure 6.2-6	Panier d'entreposage vertical : (2 étages de 6 colis primaires)	180
Figure 6.2-7	Panier d'entreposage horizontal de type Nuhoms®	180
Figure 6.2-8	Réseau à pas carré serré	187
Figure 6.2-9	Réseau à pas triangulaire serré	187
Figure 6.2-10	Réseau à pas rectangulaire (en galeries souterraines)	187
Figure 6.2-11	Puits posés au sol	188
Figure 6.2-12	Galeries à faible profondeur avec puits espacés	188
Figure 6.2-13	Puits dans une enceinte cylindrique construite à ciel ouvert	188
Figure 6.2-14	Colis disposés horizontalement sur un support	190
Figure 6.2-15	Colis disposés verticalement en lignes parallèles	190
Figure 6.2-16	Colis regroupés en paniers d'entreposage	190
Figure 6.2-17	Entreposage en emballages de transport sur radier	190
Figure 6.2-18	Entreposage de déchets HA dérivé du Nuhoms®	191

Figure 6.2-19	Entreposage vertical en paniers de 28 colis avec convection naturelle	191
Figure 6.2-20	Entreposage vertical en paniers de 28 colis avec convection forcée	191
Figure 6.2-21	Entreposage en fosse avec paniers gerbés	192
Figure 6.2-22	Architecture horizontale en galeries creusées à l'explosif ou par attaque ponctuelle	193
Figure 6.2-23	Architecture horizontale en galeries en spirale creusées au tunnelier (avec coupe sur puits d'accès en vue de droite)	193
Figure 6.2-24	Architecture horizontale en galeries courbes creusées au tunnelier (avec deux niveaux : un niveau d'entreposage et un niveau de ventilation)	193
Figure 6.3-1	Schéma du module polyvalent (vue de dessus)	197
Figure 6.3-2	Schémas des casiers pour colis primaires et colis de stockage des familles F1-3-01 et F1-3-02	198
Figure 6.3-3	Schémas des casiers pour colis primaires et colis de stockage de la famille F1-4-01	198
Figure 6.3-4	Schéma de configuration d'un puits d'entreposage	200
Figure 6.3-5	Synoptique de manutention dans l'architecture d'entreposage en puits verticaux avec regroupement des colis en casiers	200
Figure 6.3-6	Schéma de la hotte blindée de manutention individuelle des colis	202
Figure 6.3-7	Schéma de la hotte blindée de manutention des casiers	202
Figure 6.3-8	Schéma de principe de fonctionnement du procédé de refroidissement	203
Figure 6.3-9	Schéma de principe de l'écran calorifuge (vue de dessus)	204
Figure 6.4-1	Vue d'un module d'entreposage en bâtiment multi-étagé	207
Figure 6.4-2	Schéma d'un niveau (ou étage) d'entreposage (vue de dessus)	207
Figure 6.4-3	Détail de la structure de dépose des colis (coupe transversale)	208
Figure 6.4-4	Synoptique de manutention en bâtiment multi-étagé	208
Figure 6.4-5	Schéma du pont de chargement des colis	210
Figure 6.4-6	Schéma du chariot de transfert des colis	210
Figure 6.4-7	Schéma du pont d'entreposage des colis	211
Figure 6.4-8	Schéma de principe de récupération d'un colis	211
Figure 6.4-9	Schéma de circulation des fluides de refroidissement	213
Figure 6.4-10	Schéma de principe du procédé de refroidissement du concept d'entreposage en bâtiment multi-étagé	214
Figure 6.5-1	Schéma d'implantation d'un module (vue de dessus)	216
Figure 6.5-2	Schéma et plan (coupe transversale) de casemate	216
Figure 6.5-3	Plans des paniers et colis à l'intérieur (coupes longitudinales et transversales)	217
Figure 6.5-4	Schéma du bâtiment de chargement / déchargement des paniers	218
Figure 6.5-5	Synoptique de manutention dans l'atelier de chargement-déchargement	220
Figure 6.5-6	Schémas de principe du procédé de refroidissement d'une casemate	222
Figure 6.5-7	Schéma de principe des flux thermiques en partie haute de la casemate	222
Figure 6.6-1	Schéma de principe d'un module d'entreposage à faible profondeur construit à ciel ouvert	223
Figure 6.6-2	Coupe horizontale d'un module au niveau de l'espace de manutention	226
Figure 6.6-3	Demi-coupes verticales d'un module	227
Figure 6.6-4	Cloisonnement des puits de ventilation et de servitudes en trois compartiments	228
Figure 6.6-5	Exemple d'agencement de modules d'entreposage autour d'une zone centrale	228
Figure 6.6-6	Schéma de principe de la construction de l'installation par modules	229
Figure 6.6-7	Pont polaire	229
Figure 6.6-8	Retrait du bouchon (opercule mobile en place)	230
Figure 6.6-9	Dépose du bouchon	230
Figure 6.6-10	Déchargement de l'emballage blindé de transfert par la hotte	231
Figure 6.6-11	Dépose du colis dans un puits d'entreposage	231
Figure 6.6-12	Circulation d'air dans la zone d'entreposage pour le refroidissement des colis	232
Figure 6.6-13	Réseaux d'eau de refroidissement	232

Figure 6.6-14	Renouvellement d'air de la zone d'entreposage	233
Figure 6.6-15	Ventilation d'urgence	233
Figure 6.6-16	Ventilation des zones de travail et galeries souterraines	234
Figure 6.7-1	Architecture étudiée en galeries souterraines (vue en plan)	236
Figure 6.7-2	Vue en coupe d'une galerie d'entreposage	236
Figure 6.7-3	Schéma de la zone de réception des colis (vue en plan)	237
Figure 6.7-4	Vue en coupe de la galerie d'entreposage côté galerie d'accès principale	237
Figure 6.7-5	Coupe d'un puits de ventilation	238
Figure 6.7-6	Phasage des travaux de construction de l'installation d'entreposage	238
Figure 6.7-7	Transfert d'un colis à l'aide d'une nacelle circulant dans le puits foré	239
Figure 6.7-8	Extraction du colis de la nacelle de transfert	239
Figure 6.7-9	Freinage par pistonnement	240
Figure 6.7-10	Amortisseur de chute sous la nacelle	240
Figure 6.7-11	Introduction du colis dans la galerie d'entreposage (à gauche) et prise en charge par le pont roulant (à droite)	241
Figure 6.7-12	Position des râteliers libres dans la galerie d'entreposage	242
Figure 6.7-13	Illustration du retrait d'un colis dans le cadre de la surveillance	242
Figure 6.7-14	Schéma de principe de la ventilation des galeries d'entreposage	243
Figure 6.7-15	Schéma de principe de la ventilation des zones de travail et des galeries d'accès	244
Figure 6.9-1	Casiers massifs en alliage d'aluminium pour 6 colis HA de déchets vitrifiés assurant l'évacuation de la chaleur par diffusion	249
Figure 6.9-2	Casiers massifs en alliage d'aluminium pour l'empilement en puits de 6 colis primaires d'une puissance thermique maximale de 1 500 watts ou de 3 colis de stockage du concept HA1 d'entreposage de décroissance thermique	250
Figure 6.9-3	Joint labyrinthe assurant un bon coefficient de perte de charge dans l'écoulement de l'air autour du casier en cas de chute accidentelle dans un puits d'entreposage	252
Figure 6.10-1	Architecture optimisée du concept d'entreposage HA2	254
Figure 6.10-2	Casier ajouré pour la manutention sur chariot des colis de déchets HA sous les formes primaires et de stockage. Une fourche montée sur le chariot de manutention assure la dépose dans l'alvéole d'entreposage sur deux rangs	255
Figure 6.11-1	L'emballage de transport interne et le placement du canister contenant les colis de déchets HA dans la casemate d'entreposage du concept HA3 dérivé du NUHOMS	257
Figure 7.2-1	Répartition du nombre de colis primaires MAVL par groupes, pour les hypothèses d'inventaire retenues dans la phase 2007-2009	263
Figure 7.2-2	Exemples d'arrangements de colis en entreposage	264
Figure 7.2-3	Exemple de panier cylindrique (cas à 2x7 colis)	266
Figure 7.2-4	Exemple de panier parallélépipédique pour 4 fûts métalliques	266
Figure 7.2-5	Architecture sur radier avec gerbage par pont roulant	268
Figure 7.2-6	Architecture sur radier avec longrines et dépose par chariot	268
Figure 7.2-7	Architecture sur radier avec gerbage de part et d'autre d'un couloir d'accès	268
Figure 7.2-8	Architecture sur radier compartimentée avec gerbage par pont roulant	268
Figure 7.2-9	Architecture sans gerbage et manutention par transstockeur	269
Figure 7.2-10	Architecture en tubes préfabriqués (petits modules)	271
Figure 7.2-11	Architecture en galerie souterraine	271
Figure 7.2-12	Schéma de principe d'une surveillance individuelle des colis dans une architecture avec rayonnages	272
Figure 7.2-13	Schéma de principe de la ventilation d'entrepôts en surface	274
Figure 7.3-1	Schéma de hall (vue en plan)	276
Figure 7.3-2	Schéma des rayonnages	276
Figure 7.3-3	Synoptique de manutention par transstockeur	279
Figure 7.4-1	Schéma d'un hall d'entreposage avec longrines (écorché)	281

Figure 7.4-2	Synoptique de dépose des colis sur les longrines du hall d'entreposage	282
Figure 7.5-1	Section transversale d'une caverne d'entreposage à faible profondeur	284
Figure 7.5-2	Phasage de construction d'un entrepôt de six modules	285
Figure 7.5-3	Synoptique de manutention en caverne : acheminement du colis au sein de la caverne et dépose à son emplacement d'entreposage	286
Figure 7.5-4	Ventilation des zones souterraines de présence du personnel	287
Figure 7.5-5	Ventilation des cavernes d'entreposage	288
Figure 7.7-1	Hall d'entreposage du concept MAVL optimisé	291
Figure 7.7-2	Schéma de la navette de manutention des colis avec la fourche télescopique.	292
Figure 7.7-3	Les phases de chargement d'un empilement de casiers de colis primaires ou de colis de stockage par la navette munie d'une fourche télescopique	292
Figure 7.7-4	Disposition des systèmes d'analyse de la composition radioactive (ou chimique) de l'air extrait des alvéoles d'entreposage MAVL	293
Figure 7.7-5	Cloche de mesure multi-paramètres des colis de déchets MAVL en fût métallique pour une surveillance en position d'entreposage	294
Figure 8.1-1	Exemple d'arborescence matérielle simplifiée relative à l'installation E-EV-SE sur le site de la Hague	297
Figure 8.2-1	Les sollicitations d'une installation d'entreposage dans son environnement	301
Figure 8.2-2	Conceptualisation matérielle d'une installation d'entreposage vue sous l'angle de la phénoménologie et de la durabilité	305
Figure 8.3-1	Principe de fonctionnement de la ventilation passive par circulation en thermoconvection naturelle (thermosiphon)	309
Figure 8.4-1	Chronogramme des processus phénoménologiques qui affectent les composants d'une installation d'entreposage (implantée en surface)	314
Figure 9.3-1	Comportement sous les sollicitations thermomécaniques d'un alvéole d'entreposage de grande longueur de colis de déchets HA fortement exothermiques (source CEA)	320
Figure 9.3-2	Capteur de déformation à corde vibrante	320
Figure 9.3-3	Coupe du puits d'observation de l'extension de E-EV-SE (source Areva)	321

Tableaux

Tableau 2.3-1	Volume en 2030 des colis HA sur les t rois sites d'entreposage	48
Tableau 2.3-2	Volume en 2030 des colis MAVL sur les cinq sites d'entreposage existants ou prévu	49
Tableau 3.1-1	Capacités d'entreposage existantes pour les déchets HA	63
Tableau 3.1-2	Capacités d'entreposage existantes pour les déchets MAVL	64
Tableau 4.3-1	Hypothèses de mise en conteneur de stockage des familles de déchets MAVL utilisées pour les études et recherches de 2007 à 2009	116
Tableau 5.2-1	Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des CSD-C sur la période 2025-2050, évalués à partir du PIGD (2012)	150
Tableau 5.2-2	Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des colis d'enrobés bitumineux des familles F2-3-04 et F2-3-05, évalués à partir du scénario de référence du PIGD (2012).	152
Tableau 5.2-3	Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des colis de déchets solides cimentés sur la période 2025-2050, évalués à partir du PIGD (2012)	152
Tableau 5.2-4	Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des fûts d'enrobés bitumineux MAVL retirés des casemates d'entreposage de Marcoule à partir de 2017 et reconditionnés directement en conteneur de stockage, évalués à partir du PIGD (2012)[126]	155

Tableau 5.2-5	Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des fûts d'enrobés bitumineux MAVL produits par la STEL depuis 1995 et des fûts d'enrobés placés en sur-fûts de 380 litres, évalués à partir du PIGD (2012)	156
Tableau 5.2-6	Flux possibles d'expédition vers Cigéo des colis issus de la reprise et du conditionnement de déchets anciens, estimés à partir du scénario de référence du PIGD (2012)	157
Tableau 5.2-7	Capacité d'entreposage du projet DIADEM	158
Tableau 5.2-8	Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des colis de déchets MAVL faiblement irradiants sur la période 2025-2050, évalués à partir du PIGD (2012)	159
Tableau 6.3-1	Caractéristiques des casiers pour colis primaires et colis de stockage	197
Tableau 6.3-2	Epaisseurs de protection radiologique du génie civil	198
Tableau 6.3-3	Dimensions des fosses d'entreposage	199
Tableau 6.3-4	Epaisseurs de protection radiologique des hottes, calculées pour un débit de dose de 15 $\mu Sv.h^{-1}$ à 30 cm	202
Tableau 6.3-5	Evaluation des températures maximales en conditions normales et extrêmes	205
Tableau 6.4-1	Caractéristiques géométriques des alvéoles pour chaque type de colis	206
Tableau 6.4-2	Epaisseurs de protection radiologique du génie civil	206
Tableau 6.4-3	Epaisseurs de protection radiologique des portes blindées	206
Tableau 6.4-4	Evaluation des températures maximales	213
Tableau 6.5-1	Dimensions d'une casemate standardisée	216
Tableau 6.5-2	Caractéristiques des paniers pour chaque type de colis	217
Tableau 6.5-3	Epaisseurs de protection radiologique du génie civil de l'atelier de chargement-déchargement des paniers	218
Tableau 6.5-4	Epaisseurs de protection radiologique de l'emballage de transport interne pour un débit de dose de 15 $\mu Sv.h^{-1}$ à 30 cm	219
Tableau 6.5-5	Evaluation des températures maximales en conditions normales et extrêmes avec une puissance thermique unitaire des colis de 1 500 W	221
Tableau 6.7-1	Hauteurs de chutes équivalentes	240
Tableau 6.8-1	Evaluation des options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets HA existantes et novatrices (2009)	245
Tableau 6.9-1	Conductivités thermiques de différents gaz pouvant être utilisés pour le remplissage des puits d'entreposage	250
Tableau 6.9-2	Vitesse stabilisée de chute d'un casier dans un puits d'entreposage dans l'hypothèse d'un Jeu de 12 mm et d'un coefficient de perte de charge : K = 6 et présentation des paramètres correspondants	252
Tableau 7.3-1	Caractéristiques dimensionnelles d'un rayonnage et capacité d'entreposage d'un hall de 2 500 m^2 avec rayonnages	276
Tableau 7.3-2	Epaisseurs de protection radiologique du génie civil de halls d'entreposage avec rayonnages	277
Tableau 7.4-1	Capacité d'un hall d'entreposage de 2 500 m^2 sur longrines	280
Tableau 7.4-2	Epaisseurs de protection radiologique du génie civil de halls d'entreposage sur longrines	281
Tableau 7.6-1	Comparaison entre options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets MAVL existantes et novatrices	289
Tableau 7.6-2	Hypothèses des études d'optimisation du concept d'entreposage de colis MAVL	290
Tableau 8.1-1	Les grandes étapes du processus d'entreposage	298
Tableau 8.2-1	Débit de dose ($Gy.h^{-1}$) au contact d'un CSD-Ventre 1 an et 100 ans sur le dessus, le dessous, les côtés du colis après fabrication	301
Tableau 8.3-1	Exemple d'inventaire en radionucléides potentiellement gazeux de colis MAVL : cas du CSD-C	312

Encadrés

Encadré 5.1-1	Le recensement des besoins présenté en 2009	142
Encadré 5.1-2	Opportunité d'utiliser des entrepôts d'attente avant mise en stockage pour la réversibilité (recensement des besoins présenté en 2009)	149
Encadré 5.2-1	Option d'une mise en conteneur de stockage sur le site de Marcoule des enrobés bitumineux (recensement des besoins présenté en 2009)	154
Encadré 6.4-1	Procédé de refroidissement du bâtiment multi-étagé	214
Encadré 6.7-1	Réalisation de l'installation d'entreposage par modules successifs	238
Encadré 6.7-2	Ralentissement de la nacelle en cas de chute par effet de pistonnement	240
Encadré 6.7-3	Amortisseur de chute	240
Encadré 7.3-1	Eléments constitutifs du transstockeur à satellite	278
Encadré 7.5-1	Phasage de construction d'un entrepôt modulaire en cavernes à faible profondeur	285
Encadré 8.3-1	La ventilation naturelle	309

1

Démarche d'étude et de recherche sur l'entreposage des déchets HA et MAVL

1.1 La complémentarité entre le stockage réversible et l'entreposage 19
1.2 Les enseignements des recherches du CEA sur l'entreposage de longue durée 20
1.3 Le cadre des études et recherches menées depuis 2006 22
1.4 Le contenu scientifique et technique des études et recherches 24
1.5 Introduction de la structure générale du bilan des études et recherches 27

Après quinze années de recherches pilotées par le CEA et l'Andra, la loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 instituait la poursuite des études et recherches relatives à la gestion des déchets radioactifs à vie longue de haute et de moyenne activité selon trois axes complémentaires, le troisième étant l'entreposage. La loi définit l'entreposage comme « *l'opération consistant à placer [les déchets radioactifs] à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer* ».

La loi de programme stipule qu'« *après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ». L'article 2 de la loi précise que « *La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures* ».

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

La loi de programme a retenu le stockage réversible en formation géologique profonde comme l'option de référence pour la gestion à long terme des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MAVL). Dans ce cadre, l'entreposage ne vise pas à constituer une voie alternative à celle du stockage géologique profond. Il est étudié dans une optique de complémentarité avec le stockage réversible.

Dans l'exposé des motifs du projet de loi de programme, le Gouvernement a indiqué avoir fondé ce dernier « *sur les acquis des quinze années de recherche menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 et sur leur évaluation par la Commission nationale d'évaluation (...)* ». Il a souhaité orienter les études et recherches sur l'entreposage vers « *des études appliquées, qui visent à accompagner l'extension d'installations existantes ou la création de nouvelles installations (…) Il est envisagé de ne plus conduire un programme de recherche autonome mais plutôt d'accompagner la réalisation des prochaines installations dans le cadre d'études d'ingénierie.(…) Pour apporter un maximum de flexibilité, ces nouvelles installations devront prendre en compte les résultats des recherches menées sur l'axe 3.* »

Aujourd'hui, des déchets HA et MAVL sont produits, conditionnés et déjà entreposés. On bénéficie ainsi d'un important retour d'expérience industriel de l'entreposage. Les entrepôts existants disposent de capacités pour accueillir des colis de déchets supplémentaires, principalement sur le site Areva de La Hague (50) et sur les sites CEA de Cadarache (13) et de Marcoule (30). Néanmoins, des besoins en entreposage nouveaux apparaissent progressivement avec la jouvence des installations, les productions futures des déchets, les évolutions en matière de conditionnement. A terme, les besoins évolueront avec la mise en exploitation du centre de stockage. Les études et recherches réalisées depuis 2006 ont visé à la fois à recenser ces besoins nouveaux et à rechercher des réponses techniques les plus adaptées en exploitant l'expérience acquise.

Pour ce faire elles ont exploré les différents volets de la complémentarité entre l'entreposage et le stockage. Elles se sont intéressées à l'ingénierie des entrepôts et à leur comportement phénoménologique. Des pistes d'amélioration et des options techniques novatrices ont été recherchées pour les projets futurs.

Les objectifs fixés par la loi de programme du 28 juin 2006, notamment la complémentarité des trois axes de recherches, constituent une évolution notable par rapport aux concepts d'entreposage de longue durée qui avaient fait l'objet de recherches du CEA dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991. Néanmoins, lors du lancement du programme d'études et de recherches sur l'entreposage, l'Andra a recueilli les connaissances et l'expérience acquises par le CEA. Il s'est agi notamment de capitaliser les enseignements visant à une plus grande durabilité.

Au-travers d'une collaboration qui s'est instituée entre l'Andra et les exploitants nucléaires, des avancées peuvent d'ores et déjà être intégrées dans la conception des projets industriels. Cela a concerné particulièrement l'extension de l'entreposage des déchets HA vitrifiés en cours de construction sur le site Areva de La Hague.

Ce rapport dresse le bilan des études et des recherches coordonnées par l'Andra sur l'entreposage des déchets radioactifs HA et MAVL. Il se fonde sur les propositions d'études que l'Andra a présentées en 2009. Il reprend les principaux éléments du dossier établi en 2009 et les complète avec l'ensemble des résultats obtenus

1.1 La complémentarité entre le stockage réversible et l'entreposage

L'entreposage et le stockage des déchets HA et MAVL se complètent pour optimiser la filière de gestion des déchets HA et MAVL en matière d'impact sur l'homme et l'environnement, de sûreté et de coûts d'investissements et de fonctionnement, et assurer la réversibilité du stockage.

La filière de gestion des déchets va de leur production jusqu'au stockage réversible, en passant par le conditionnement et le transport. Cette filière comprend des étapes d'entreposage. Chacune autorise un découplage entre les opérations situées en amont et celles en aval, elle donne ainsi de la flexibilité aux décisions sur ces opérations et elle offre des possibilités d'optimisation technico-économique de chaque opération.

En matière de complémentarité avec le stockage, le premier objectif de l'entreposage est de permettre d'attendre la mise en exploitation en 2025 du Centre industriel de stockage géologique (projet « Cigéo »). Les besoins d'extension ou de création d'installations doivent être recensés en priorité dans cet objectif.

Au-delà de la mise en exploitation du centre de stockage, l'entreposage intervient dans la gestion par étapes du stockage. Cette gestion par étapes, associée à un processus décisionnel ouvert et progressif, constitue un volet des propositions de l'Andra en matière de réversibilité.

L'entreposage permettra alors d'organiser les campagnes d'exploitation de Cigéo, en apportant de la flexibilité pour planifier les travaux de construction des alvéoles de stockage, les transports et la mise en stockage des colis. Par exemple chaque campagne d'exploitation du stockage pourra se focaliser sur un nombre limité d'ouvrages souterrains exploités simultanément ou sur un spectre réduit de colis de déchets dans une optique d'optimisation de l'exploitation au plan technico-économique..

Pour certains déchets, une phase de décroissance radioactive en entreposage avant la mise en stockage est techniquement nécessaire. Cela concerne particulièrement les déchets HA fortement exothermiques. En effet leur dégagement thermique initial (jusqu'à 4 kilowatts par colis à la production) est incompatible avec les fonctions de sûreté du stockage. Une durée minimale de 60 ans est nécessaire pour les colis types C1, leur conférant une puissance thermique de 500 watts par colis compatible avec une mise en stockage.

Une architecture de stockage avait ainsi été présentée en 2005 pour un scénario de mise en stockage au plus tôt, c'est-à-dire en 2050. Les études ont montré depuis l'intérêt d'un prolongement de l'entreposage, afin de bénéficier d'une décroissance thermique supplémentaire diminuant l'emprise du stockage : entre 60 années et une durée de l'ordre du siècle, l'extension souterraine des installations de stockage, la complexité de leur mise en œuvre et par conséquent leur coût, diminuent avec la durée d'entreposage finalement adoptée ; au-delà, les diminutions supplémentaires à attendre deviennent négligeables. Pour assurer la décroissance thermique des déchets HA, on peut utiliser une installation unique dimensionnée pour accueillir des déchets très chauds ou envisager des installations successives, sachant qu'un niveau de puissance thermique modéré en entrée (par exemple un kilowatt par colis) ouvre la possibilité d'options techniques novatrices.

En application du principe de réversibilité, l'entreposage constitue aussi l'un des modes de gestion possibles de colis qui seraient retirés du stockage, le cas échéant. Pour les déchets HA, la puissance thermique aura alors plus ou moins décru pendant la phase de stockage. En tout état de cause, la réversibilité n'impose pas de disposer de capacités d'entreposage dans l'attente d'un retrait éventuel de colis de déchets. En effet, au plan technique, il suffirait de quelques années (trois à cinq ans) pour créer, éventuellement par tranches successives, de nouvelles installations capables de gérer les colis que l'on aurait décidé de retirer du stockage.

Enfin, l'entreposage peut constituer un moyen privilégié d'observation-surveillance de l'évolution des colis. Cela concerne par exemple la décroissance de la production de gaz de radiolyse par les colis MAVL. La décroissance radioactive (βγ) ou la consommation progressive des matières soumises à radiolyse (α) au voisinage des radionucléides peuvent conduire à une diminution dans le temps du dégagement de gaz de certains colis (notamment ceux contenant des déchets organiques α).

Ces différents volets de la complémentarité entre l'entreposage et le stockage conduisent à envisager des durées de fonctionnement d'entrepôts jusqu'à environ un siècle : d'une part certains colis pourront y être entreposés sur une durée supérieure à 50 ans ; d'autre part on pourrait aussi utiliser des installations d'entreposage avec rotation des colis allant jusqu'à cette échelle de temps, qui correspond à celle de l'exploitation du stockage. Une telle durée se situe à la limite du savoir-faire industriel actuel.

1.2 Les enseignements des recherches du CEA sur l'entreposage de longue durée

Le troisième axe de recherche sur la gestion des déchets définis par la loi du 30 décembre 1991 portait sur « *les procédés de conditionnement des déchets et l'entreposage de longue durée en surface ou en sub-surface* ».

Cet axe de recherche a été confié au CEA qui a ainsi étudié l'entreposage de longue durée de la totalité des déchets HA et MAVL pris en compte parallèlement par l'Andra pour l'étude du stockage en formation géologique profonde. Cet axe de recherche couvrait aussi les combustibles usés dans une hypothèse de non traitement ou de traitement différé. L'objectif initial de l'étude était d'évaluer la faisabilité d'une durée d'exploitation des entreposages au-delà de la centaine d'années (jusqu'à 300 ans) et de simplifier leur surveillance et leur maintenance, afin d'en réduire la charge sur le long terme et d'en accroître ainsi la pérennité.

La puissance publique avait demandé que des options en surface et en sub-surface soient étudiées indépendamment du choix d'un site. Finalement, six architectures ont été développées par le CEA pour les déchets MAVL, les déchets HA vitrifiés et les combustibles usés. Pour les déchets MAVL, le conteneur d'entreposage considéré dans ces architectures était commun avec le stockage (cf. chapitre 4).

Le CEA et l'Andra ont réalisé une revue commune de l'ensemble du programme réalisé par le CEA, dans l'objectif de transférer dans les meilleures conditions et le plus complètement possible les connaissances issues de ces études menées jusqu'en 2005. Sur les différents thèmes, le CEA et l'Andra se sont attachés à mettre en évidence les besoins complémentaires qui existeraient dans le cadre de la consolidation du dossier d'un entrepôt de durée séculaire, durée correspondant à l'objectif des études de l'Andra dans une complémentarité avec le stockage.

Pour une durée d'entreposage potentiellement pluriséculaire, un fonctionnement le plus passif possible a été privilégié par le CEA. En particulier, les conditions d'une ventilation naturelle ont été recherchées. Une méthodologie de surveillance fondée sur l'observation de colis témoins inactifs et d'alvéoles d'entreposage d'observation gardées vides de tout colis a été proposée, complétée par des contrôles destructifs espacés dans le temps sur des colis réels.

Afin d'explorer la robustesse des concepts nouveaux d'entreposage dont il avait à évaluer la faisabilité, le CEA a été amené à prendre en compte, dans son analyse de risque, des scénarios accidentels avec des paramètres majorés par rapports aux règles habituelles applicables aux INB.

La durabilité des structures a été recherchée par le CEA en recourant à des matériaux éprouvés dont les mécanismes d'altération sont maîtrisés et prévisibles et en instaurant naturellement autour des colis de déchets, dans les alvéoles ou les fosses d'entreposage, des conditions hygrométriques et thermiques favorables.

Les mécanismes d'altération des bétons, des fontes et des aciers dans les ambiances de l'entreposage et sous les chargements thermomécaniques correspondant aux conditions normales ou accidentelles, ont été explorés. Pour les aciers, une attention particulière a été portée à la corrosion sèche et à la détection d'éventuelles modifications microstructurales aux températures intermédiaires (100 °C – 350 °C).

Pour les bétons armés, les processus de vieillissement sont liés d'une part à une carbonatation des liants hydrauliques et à la dépassivation des aciers des armatures qu'elle entraîne, d'autre part à la migration d'ions chlorures ou sulfates amenés éventuellement par les aérosols contenus dans l'air de la ventilation. Dans le cadre de ces recherches, le CEA a développé des modèles et réalisé des essais de validation sur échantillons de laboratoires et sur maquettes en semi-grandeur.

Les recherches ont porté également sur les techniques de refroidissement des colis HA par ventilation en chambre (flux transversal d'air sur un alignement de colis disposés en quinconce) ou en puits. L'effort de modélisation numérique s'est appuyé sur des modélisations en soufflerie, pour la détermination de certains paramètres d'échange particulièrement complexes du fait de la priorité donnée à une ventilation par convection naturelle.

Les recherches ont montré les limites des concepts d'entreposage de longue durée étudiés par le CEA. Vis-à-vis de la durabilité des installations, la Commission nationale d'évaluation (CNE) a considéré en 2006 que la possibilité de prolonger au-delà d'un maximum de 100 ans, la période d'exploitation d'un entreposage n'était pas démontrée.

Dans l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques, entreposer des déchets sur plusieurs siècles imposerait donc un renouvellement périodique des installations.

Une autre limite concerne la passivité de l'installation. La sûreté de l'installation impliquera nécessairement une maintenance et une surveillance régulières. Si des structures d'entreposage en surface ou en sub-surface aussi passives que celles étudiées par le CEA étaient laissées en l'état, elles ne pourraient protéger durablement l'homme et l'environnement de la radioactivité des déchets.

Seules des installations de stockage dans une formation géologique appropriée, placées suffisamment à l'abri des évolutions naturelles et anthropiques, et sous réserve de pouvoir être fermées, seront capables d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement sans reposer à terme sur la capacité de la société à maintenir ou renouveler une installation industrielle sur de longues durées.

Dans son avis sur les recherches rendu au Gouvernement le 1er février 2006, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a considéré « *que l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue* » car il « *suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et leur reprise par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années* »[1].

Parmi les enseignements à tirer de ces recherches, outre une exploration de la limite de faisabilité en matière de durée d'entreposage, on notera que rechercher par principe une passivité maximale n'est pas nécessairement pertinent pour un entreposage, au-delà de l'approche technico-économique des conditions de maintenance de l'installation. La surveillance et l'observation apparaissent comme une bonne pratique sur des installations destinées à être exploitées à l'échelle séculaire, à l'instar de ce que l'Andra a proposé pour le stockage réversible.

1.3 Le cadre des études et recherches menées depuis 2006

Afin d'organiser les études et recherches sur l'entreposage prescrites par la loi de programme du 28 juin 2006, l'Andra en a établi le programme en 2007. Conformément à la loi, ce programme visait à la possibilité d'applications concrètes via l'extension d'entrepôts existants ou la création de nouvelles installations d'ici 2015. L'Andra l'a présenté à Areva, au CEA et à EDF en octobre et novembre 2007, au Conseil scientifique de l'Andra en décembre 2007, à la CNE en janvier 2008. Les observations ont ainsi pu être prises en compte.

Le décret n° 2008-357 du 16 avril 2008 fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) spécifiait que « *au plus tard le 31 décembre 2009, sur la base de l'inventaire des déchets et des capacités d'entreposage, et des besoins d'entreposage qui en découlent, l'Andra propose aux ministres chargés de l'énergie, de la recherche et de l'environnement des études qu'elle propose de mener sur les évolutions possibles en matière d'entreposage* ».

Le décret stipulait aussi que les futures installations d'entreposage des déchets de haute et de moyenne activité à vie longue sont implantées en prenant en compte les volumes de déchets transportés et les distances à parcourir entre les lieux d'entreposage et les lieux de stockage. Cette disposition suggérait de privilégier les sites de conditionnement des déchets ou éventuellement le site de stockage.

Conformément au décret du 16 avril 2008, l'Andra a présenté dans le dossier qu'elle a remis fin 2009 ([2]) un premier recensement des besoins en entreposage et un ensemble de propositions d'études fondés sur une analyse de la complémentarité de l'entreposage et du stockage.

Ces propositions ont alors fait l'objet d'évaluations et d'échanges avec les parties prenantes, qui ont ensuite permis à l'Andra de poursuivre les études et recherches sur des orientations partagées.

---

[1] « *L'entreposage de déchets ou de combustible irradié correspond à des solutions provisoires de gestion. Il est dans tous les cas nécessaire de procéder à une surveillance du site et à une reprise des colis avant que le temps n'ait pu affaiblir les barrières dans lesquelles les éléments radioactifs sont confinés, avant la mise en œuvre d'une solution d'élimination définitive.* »

[2] Inventaire des capacités d'entreposage existantes, état d'avancement des études de concepts d'entreposage, propositions d'options à étudier après 2009, Andra 2009

Suite à son évaluation du dossier, l'ASN a indiqué dans son avis n° 2011-AV-129 du 26 juillet 2011 que « *l'analyse des besoins d'entreposage préalablement au stockage n'appelle pas d'observation particulière* » de sa part. Toutefois, l'ASN recommande « *que les études soient poursuivies entre l'Andra et les producteurs de déchets concernés de façon à disposer en temps voulu des capacités nécessaires à l'entreposage des déchets de moyenne et haute activité à vie longue avant leur stockage* ».

La CNE s'est prononcée principalement sur deux thèmes, le lien avec la réversibilité du stockage et l'implantation de nouvelles installations d'entreposage. Dans son rapport n°5 de novembre 2011 la Commission considère « *que l'entreposage des déchets éventuellement retirés d'un stockage est une question qui doit être considérée avec rigueur pour établir le cahier des charges des [zones d'implantation des installations de surface du projet Cigéo] mais qu'elle n'appelle pas une réponse pratique à courte échéance.* ». Elle observe que « *l'Andra devra continuer à y consacrer des moyens de recherche suffisants pour apporter en temps voulu les réponses souhaitables.* » Si un module d'entreposage de colis retirés du stockage peut être considéré comme faisant partie intégrante du projet de centre de stockage souterrain, la Commission s'interroge sur l'entreposage de décroissance thermique : « *Ne s'agirait-il pas d'un projet, distinct de celui du centre de stockage souterrain de stockage ?* »

En matière d'implantation, la revue du projet Cigéo effectuée au premier semestre 2011 sous l'égide du ministère chargé de l'énergie a recommandé de disposer sur le site du stockage d'un entreposage permettant de gérer de façon optimale les arrivées et la meilleure utilisation des volumes de stockage, mais excluant tout entreposage visant à se substituer à celui assuré par les producteurs de déchets.

Cette recommandation rejoint les positions exprimées par les acteurs locaux en Meuse / Haute-Marne en 2010 et 2011, qui conduisent à ne pas envisager d'installation d'entreposage de décroissance thermique sur le site de stockage.

La poursuite des études et recherches s'est ainsi adressée à des installations d'entreposage implantées sur les sites des producteurs. La conception de l'entreposage tampon[3] de Cigéo pourra néanmoins bénéficier de ces études et recherches.

Le décret n° 2012-542 du 23 avril 2012 établissant les prescriptions du PNGMDR rappelle que « *l'Andra pilote et coordonne les études et recherches sur l'entreposage.* » Il précise que « *l'Andra mène ces études et recherches en concertation avec les exploitants nucléaires sur la base de leurs déclarations en vue de l'établissement de l'inventaire des matières et déchets radioactifs.* » Il spécifie que « *l'Andra remet aux ministres chargés de l'énergie, de l'environnement, de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, au plus tard le 31 décembre 2012, un bilan des études et recherches sur l'entreposage dont les objectifs et le contenu sont définis par arrêté par ces ministres.* »

L'arrêté du 23 avril 2012 spécifie que « *Le bilan propose en particulier des scénarios de gestion des colis de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue destinés au projet de centre de stockage géologique profond, en précisant notamment les chroniques d'entreposage, de désentreposage, de conditionnement, de transport et de mise en stockage, ainsi que les besoins en entreposage en résultant. Il approfondit l'étude remise fin 2009 aux ministres en charge de l'énergie, de la recherche et de l'environnement proposant des concepts techniques, en tenant compte du principe de complémentarité entre l'entreposage et le stockage.* »

Le PNGMDR 2010-2012 prévoit que la collaboration entre l'Andra et les producteurs « *sera (…) développée pour capitaliser le retour d'expérience de la conception, de la construction et du fonctionnement des installations* [d'entreposage] *et pour renforcer la complémentarité entre les projets d'installations d'entreposage sur sites de production ou de conditionnement et le futur centre de stockage géologique profond* ».

[3] La capacité limitée d'entreposage tampon de Cigéo est déterminée à partir des études de flux menées dans le cadre des études de conception industrielle du projet.

Les études d'entreposage coordonnées par l'Andra ne traitent que les colis de déchets. L'entreposage de combustibles usés dans l'attente de leur traitement n'entre pas dans le périmètre de ces études et recherches (qu'il s'agisse d'un entreposage de décroissance ou de transit avant traitement, pour les combustibles UOX, ou d'attente d'un traitement différé, pour les combustibles MOX).

1.4 Le contenu scientifique et technique des études et recherches

Conne indiqué supra, les études et recherches se sont déroulées en deux phases, la première de 2007 à 2009, la seconde de 2010 à 2012.

La phase 2007-2009 avait été planifiée pour formuler en 2009 des propositions d'études pour la phase suivante. Le travail réalisé de 2007 à 2009 s'est ainsi articulé autour d'une première analyse des besoins en nouvelles capacités d'entreposage et de la recherche d'options techniques répondant aux objectifs de complémentarité avec le stockage, notamment pour conforter la durabilité et la robustesse d'installations d'entreposage adaptées pour fonctionner environ un siècle. L'Andra a pris en compte dans ces travaux l'état des lieux à l'international sur les pratiques et les projets en matière d'entreposage.

Partant des propositions formulées en 2009, la phase 2010-2009 a consisté d'une part à poursuivre l'étude de scénarios de gestion des déchets associant l'entreposage et le stockage dans une logique de complémentarité, d'autre part à approfondir l'étude d'options techniques d'entrepôts innovants.

Parallèlement les recherches en matière de matériaux (aciers et bétons) et de moyens d'observation et de surveillance se sont poursuivies.

1.4.1 Analyse des besoins en entreposage

<u>Phase 2007-2009</u>

L'Andra a fourni en 2009 un recensement global des besoins en nouvelles capacités d'entreposage, précisant quels colis de déchets et quelles quantités sont concernés compte tenu des productions à venir et de la reprise et du conditionnement de déchets anciens. Pour le court et le moyen terme (jusqu'à 2030), ce recensement s'est fondé sur l'édition 2009 de l'inventaire national des matières et des déchets radioactifs, sur une analyse des capacités des entrepôts existants et sur une hypothèse d'autorisation de mise en exploitation de Cigéo à l'horizon 2025. Les besoins ainsi recensés ont été mis en regard des projets des exploitants nucléaires.

Pour évaluer les perspectives à plus long terme, ce recensement comportait une esquisse de scénario de livraison des colis sur le site de Meuse / Haute Marne et de stockage des colis. Cette esquisse s'inscrivait dans une première approche du système global de gestion des déchets composé de l'entreposage et du futur stockage.

Il s'agissait d'un travail exploratoire visant à proposer et initier un processus d'optimisation du système de gestion des déchets. Ce travail a aussi permis d'illustrer concrètement la complémentarité de fonctionnement entre les installations d'entreposage des producteurs et le stockage.

Par ailleurs l'Andra a analysé les fonctions que les futurs entrepôts auront à satisfaire pour être complémentaires au stockage. Les caractéristiques de ces fonctions diffèrent selon la position de l'entreposage dans la filière de gestion des colis de déchets, notamment en matière de natures des colis entreposés, de durées d'entreposage de ces colis et de durées d'exploitation de l'installation. Différents types d'entrepôts envisageables ont ainsi été identifiés et leurs fonctions caractérisées. Les exigences réglementaires et en matière de sûreté ont été rassemblées.

Phase 2010-2012

Les échanges entre l'Andra et les producteurs se sont focalisés en 2010 sur l'ordonnancement des livraisons de colis de déchets vers Cigéo. Ce travail s'est concrétisé en janvier 2012 par la finalisation de la première version du programme industriel de gestion des déchets (PIGD). Ce programme fixe l'inventaire des déchets à retenir pour le projet Cigéo et définit l'ordonnancement et les flux prévisionnels de livraison des colis. Il vise à planifier et mettre en cohérence les moyens industriels à mettre en œuvre dans le cadre du développement de ce projet.

Le PIGD a constitué une donnée d'entrée pour l'Andra. Elle lui a permis de mener en 2012 les études d'esquisse industrielle du projet Cigéo et de préparer le débat public. Le PIGD fonde aussi la description fournie en 2012 des scénarios envisageables de gestion des colis de déchets destinés à Cigéo ainsi que la mise à jour des besoins en entreposage qui en résulte.

L'optimisation des scénarios de gestion des déchets HA-MAVL devra se poursuivre au-delà de 2012. Elle conduira en 2013 à une révision de l'ordonnancement et des flux prévisionnels de livraison des colis à Cigéo (PIGD).

1.4.2 Recherche d'options techniques favorisant la complémentarité avec le stockage

Une recherche d'options techniques d'entreposage a été entreprise pour évaluer les possibilités techniques en matière de complémentarité entreposage-stockage, proposer des évolutions dans la conception des entrepôts et apporter des éléments de comparaison. Ce travail a revêtu un caractère exploratoire. Il n'a pas cherché à figer des solutions techniques.

En plus de l'examen de solutions déjà opérationnelles, il s'est agi d'explorer des fonctionnalités ou des solutions nouvelles par rapport aux entrepôts industriels existants, pour mieux s'adapter à la diversité des colis ou pour renforcer la surveillance ou la robustesse.

La loi de programme ouvre la définition de l'entreposage à des installations en « faible profondeur ». Dans un souci de complétude par rapport à cette définition, le programme s'est intéressé de 2007 à 2009 à des options à faible profondeur parallèlement à des options plus classiques en surface : l'objectif était d'évaluer l'intérêt éventuel que ce type d'option pourrait offrir au plan de la robustesse ainsi que ses limites techniques.

D'une manière générale, le travail de recherche a consisté à rassembler les connaissances disponibles sur les méthodes et installations d'entreposage, y compris les retours d'expérience, et à développer des connaissances technologiques et scientifiques complémentaires. En complément du retour d'expérience des exploitants nucléaires, l'Andra a mobilisé sur ces actions des ingénieries spécialisées ainsi que des partenaires scientifiques, principalement le CEA.

Au plan technologique, l'Andra a réalisé en 2008 un appel d'offres européen pour la recherche et l'étude de concepts d'installations. Le cahier des charges était fondé sur la typologie et les fonctions de l'entreposage complémentaire au stockage ; il privilégiait la recherche d'améliorations et d'innovations dans les domaines de la robustesse, de la durée d'exploitation (séculaire), de la facilité de manutention des colis et de surveillance, de l'adaptabilité aux différents types de colis… A la suite de cet appel d'offre, les ingénieries retenues pour participer au programme furent Areva Ingénierie (SGN), Areva TA et Tractebel Engineering (Itena, Coyne et Bellier).

Les études d'ingénierie ainsi réalisées sur la période 2008-2009 ont eu pour vocation d'explorer diverses hypothèses techniques. Elles ont procédé en deux sous-phases. La première sous-phase, jusqu'à l'automne 2008, a consisté à identifier de manière aussi large que possible des solutions techniques susceptibles de répondre aux besoins, et de les comparer. Au terme de cette sous-phase, quelques options ont été retenues pour faire l'objet de la seconde sous-phase en 2009.

Celle-ci a consisté à amener ces concepts au niveau d'esquisses, permettant une évaluation de faisabilité. Le choix de ces options s'est appuyé sur des critères d'aptitude à la robustesse et à la durabilité, d'adaptabilité et d'évolutivité, ainsi que sur leur caractère innovant par rapport aux solutions opérationnelles.

A partir de 2011, l'Andra a approfondi l'étude des concepts innovants mis en exergue à l'issue de la période 2007-2009. Quatre concepts, en surface, ont ainsi été sélectionnés parmi ceux présentés en 2009 (trois pour les déchets HA, un pour les déchets MAVL). Les études ont visé à optimiser ces concepts au plan technique et à définir des systèmes de surveillance de l'évolution des structures et des colis sur une durée séculaire. Suite à un second appel d'offres européen, Tractebel Engineering a été associé à cette nouvelle phase d'étude.

Parallèlement à l'ingénierie de l'entreposage, des acquisitions de connaissances scientifiques ont été menées sur l'ensemble de la période 2007-2010 dans une optique d'augmentation de durabilité et de robustesse des entrepôts par rapport à l'état de l'art. Cela a porté principalement sur le comportement et l'évolution des bétons[4] ; des recherches ont aussi été menées sur la corrosion de matériaux métalliques en situation d'entreposage. Il est à noter qu'une partie de ces recherches intéressent également le projet Cigéo, notamment pour les dispositifs visant à favoriser la réversibilité à l'échelle séculaire.

Enfin, l'Andra a mené en 2009 une analyse phénoménologique de l'entreposage, sur le modèle de la méthode de l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) qu'elle met en œuvre pour le stockage géologique profond. L'analyse a mis en lumière les processus et les dispositions qui permettraient de conforter la durabilité et la robustesse des ouvrages sur une durée d'ordre séculaire.

Afin de couvrir un domaine de fonctionnement représentatif, l'Andra a analysé les concepts d'installations d'entreposage de surface du type de celles en cours d'exploitation sur le site de La Hague (« E-EV-SE » pour les déchets HA et « ECC » pour les déchets MAVL). Les principaux enseignements ont été intégrés dans les études d'ingénierie mentionnées ci-dessus.

1.4.3 Extension ou création d'installations d'entreposage

Compte tenu des limites de capacités d'entreposage actuelles sur le site de La Hague et de la production à venir de colis de déchets HA vitrifiés, Areva construit une extension de l'installation E-EV-SE. Au stade des études d'avant-projet sommaire, Areva et l'Andra ont collaboré sur la conception de cette extension, dans une optique de lui conférer une plus grande durabilité. Cette collaboration a abouti à l'intégration de plusieurs innovations : adoption d'un béton plus résistant à la carbonatation et à la chloruration, modification de la conception de l'installation pour une meilleure protection des pièces métalliques sensibles vis-à-vis de la corrosion, réservation d'un puits d'entreposage pour l'exposition des matériaux témoins de colisage et de structure soumis aux conditions de température et d'irradiation.

Afin de gérer les déchets MAVL d'exploitation et de déconstruction de ses réacteurs électrogènes, EDF réalise une installation centralisée de conditionnement et d'entreposage de ces déchets (projet « Iceda ») sur le site de la centrale du Bugey (01). EDF et l'Andra initient actuellement une étude collaborative des dispositifs d'observation et de surveillance qui pourront y être intégrés.

Par ailleurs, le recensement des besoins en entreposage fait apparaître le besoin de créer de nouvelles capacités sur les sites CEA de Marcoule et de Cadarache. Un travail collaboratif entre le CEA et l'Andra pourra favoriser l'inscription de ces futures capacités dans une complémentarité avec le stockage.

[4] En 2006, la CNE recommandait de mieux identifier les mécanismes affectant la tenue à long terme des structures en béton armé, en d'en déduire des dispositions constructives pour limiter leur vieillissement.

A plus long terme, de nouvelles extensions ou créations d'installations d'entreposage seront nécessaires. Elles accompagneront la production de colis de déchets (en particulier les déchets HA qui ne peuvent pas être stockés avant soixante ans au moins pour des raisons thermiques, voir plus haut). Des solutions nouvelles ressortant des études et recherches pourront s'appliquer à ces besoins à plus long terme. Elles pourraient aussi s'appliquer à d'éventuels futurs entrepôts pour la gestion de colis qui seraient retirés du stockage, dans le cadre de la réversibilité.

1.5 Introduction de la structure générale du bilan des études et recherches

Les chapitres suivants décrivent les principales données d'entrée du recensement des besoins en entreposage. Le chapitre 2 synthétise les connaissances sur les colis de déchets à gérer en entreposage. Le chapitre 3 présente les installations existantes, à la fois sous l'angle des capacités encore disponibles et sous celui du retour d'expérience industriel de l'entreposage. Enfin le chapitre 4 décrit les principaux enjeux à l'interface avec l'entreposage et le stockage réversible en formation géologique profonde.

L'étude de scénarios entreposage-stockage est présentée au chapitre 5, ainsi que les besoins en entreposage en résultant. Le chapitre rend compte des deux phases successives d'études : 2007-2009 et 2010-2012. Sont également décrites les fonctions à satisfaire et contraintes à prendre en compte par les entreposages, notamment en matière de sûreté.

Les chapitres 6 à 8 rendent compte des recherches sur les options techniques d'entreposage qui ont été effectuées depuis 2007. Les chapitres 6 et 7 présentent les aspects technologiques de l'ingénierie d'installations d'entreposage, respectivement pour les déchets HA et MAVL. Le chapitre 8 synthétise l'analyse phénoménologique des installations d'entreposage.

Le chapitre 9 présente les travaux que l'Andra et Areva ont mené en commun dans le cadre de la préparation de la construction de l'extension de E-EV-SE pour prendre en compte les résultats des recherches.

Enfin, le chapitre 10 conclut sur des perspectives pour les années à venir.

2

Les déchets HA et MAVL

2.1 Colis de déchets HA 31
2.2 Colis de déchets MAVL 34
2.3 Volumes en 2030 (IN 2012) 48

Les déchets HA et MAVL résultent de l'industrie électronucléaire, ainsi que d'activités de recherche et de la défense nationale.

Les déchets HA et MAVL de l'industrie électronucléaire proviennent essentiellement des combustibles usés déchargés des réacteurs de production d'électricité. Les combustibles à l'oxyde d'uranium (UOX) déchargés des 58 réacteurs EDF en opération sont actuellement traités par Areva dans ses usines de La Hague[5] : 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). Il s'y ajoute 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 fabrication et de traitement des combustibles (déchets dits « technologiques » - pièces remplacées ou obsolètes, contaminées par les matières radioactives traitées... ; effluents liquides...). Des déchets proviennent aussi de l'usine aujourd'hui arrêtée de Marcoule, qui a traité des combustibles de la filière de réacteurs de première génération UNGG (Uranium naturel, graphite gaz).

Les déchets HA et MAVL issus d'autres activités que la production électronucléaire (recherche, défense) sont le plus souvent des déchets technologiques, ainsi que des résidus de traitement d'effluents. On notera par ailleurs l'existence de combustibles usés issus du réacteur à eau lourde EL4 (Brennilis) caractérisés par un faible potentiel de valorisation qui conduit à les considérer comme des déchets.

Les déchets sont conditionnés[6] par leurs producteurs. Le conditionnement consiste à solidifier, immobiliser les déchets qui ont été engendrés sous une forme dispersable et à les placer dans un conteneur qui en facilite la manutention et l'entreposage dans les installations industrielles. Le colis ainsi produit est dénommé « colis primaire », pour le distinguer du « colis de stockage » : le colis de stockage est constitué du colis primaire placé dans un conteneur de stockage, forme sous laquelle les déchets seront placés dans les alvéoles de stockage (cf. chapitre 4).

Une partie des déchets HA et MAVL sont d'ores et déjà produits, et entreposés, sous forme conditionnée ou non, sur les sites de production. D'autres sont à produire, soit avec un conditionnement dans la continuité du fonctionnement des installations nucléaires existantes, soit avec des adaptations qui ne sont pas encore figées.

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 charge l'Andra « *d'établir, de mettre à jour tous les trois ans et de publier l'inventaire des matières et déchets radioactifs présents en France ainsi que leur localisation sur le territoire national* ».

Le dossier remis par l'Andra en 2009 pour présenter un premier recensement des besoins en entreposage et un ensemble de propositions d'études (voir le chapitre 1) se fondait sur l'édition 2009 de l'inventaire national des matières et des déchets radioactifs (IN 2009). Les études et recherches sur l'entreposage effectuées dans la période 2010-2012 sont associées à l'édition 2012 (IN 2012) : le décret n° 2012-542 du 23 avril 2012 précise que « *l'Andra mène ces études et recherches en concertation avec Areva, le CEA et EDF sur la base de leurs déclarations en vue de l'établissement de l'inventaire des matières et des déchets radioactifs* ».

---

[5] Les combustibles MOX, élaborés à partir de plutonium issu du traitement des combustibles usés UOX, restent aujourd'hui entreposés en piscines.

[6] Actuellement, le conditionnement des déchets de traitement des combustibles usés 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 traité 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. Toutefois, à l'exception des solutions dites UMo, les solutions de produits de fission ont toutes été conditionnées, ainsi que, à Marcoule, les boues issues de la filtration ou de la concentration par évaporation des effluents.

Ce chapitre synthétise les connaissances des colis primaires de déchets HA et MAVL en entrée au recensement des besoins et aux études d'entreposage. Ces colis sont identifiés par leurs familles de l'IN 2012.

2.1 Colis de déchets HA

Les déchets HA sont, pour l'essentiel, les produits de fission et les actinides mineurs (neptunium, américium et curium) contenus dans les combustibles usés, qui sont séparés de l'uranium et du plutonium lors du traitement. Ils sont calcinés et incorporés dans une matrice de verre. Le verre est coulé en température dans un conteneur en acier inoxydable. En général la haute activité β-γ des déchets HA vitrifiés génère un dégagement thermique important, qui décroît dans le temps, principalement avec la décroissance radioactive des produits de fission à période moyenne (de l'ordre de 30 ans pour le césium 137 et pour le strontium 90).

La vitrification a été développée dans des installations pilotes, principalement l'atelier PIVER[7] de l'installation APM[8] au CEA Marcoule, aujourd'hui arrêté. Elle a été mise en œuvre industriellement dans trois ateliers : Atelier de vitrification de Marcoule (AVM), démarré en 1978, ateliers de vitrification R7 (usine UP2-800) et T7 (usine UP3) 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 traités dans ces installations, (ii) la concentration plus ou moins élevée des produits de fission dans le verre, (iii) l'âge des déchets.

Ainsi, on peut distinguer plusieurs ensembles de colis de déchets HA vitrifiés regroupant respectivement (i) les productions de déchets plus anciennes (§ 2.1.1), (ii) les productions actuelles et prévisionnelles (§ 2.1.2).

Sont également rattachés à la catégorie HA les combustibles usés du réacteur EL4 qu'il n'est pas envisagé de traiter (§ 2.1.3) ainsi que des déchets divers en faible quantité (sources radioactives…).2.1.4).

2.1.1 Déchets HA vitrifiés issus de productions anciennes (familles F1-4-01, F1-5-01, F1-3-02)

Cet ensemble de colis comprend (i) les colis de déchets vitrifiés contenant des produits de fission provenant du traitement de combustibles issus de réacteurs UNGG et de combustibles issus du réacteur à neutrons rapides Phénix, entreposés dans l'installation APM au CEA Marcoule (famille F1-5-01[9]), (ii) les colis de déchets vitrifiés produits et entreposés dans l'atelier de vitrification de Marcoule (AVM/SVM) contenant les produits de fission et actinides issus, pour l'essentiel, du traitement de combustibles UNGG (famille F1-4-01), (iii) les colis contenant des solutions molybdiques de produits de fission vitrifiées, dites UMo (CSD-U), provenant des combustibles UNGG traités antérieurement sur le site de La Hague (famille F1-3-02). Il s'y ajoutera les déchets vitrifiés de l'installation de R&D Atalante.

Ces colis se différencient notamment par leur contenu radiologique et consécutivement leur puissance thermique, ainsi que par la géométrie des conteneurs. Globalement, ces déchets présentent une puissance thermique modérée en comparaison des productions actuelles.

---

7 PIVER : Pilote industriel de vitrification
8 APM : Atelier pilote de Marcoule
9 La famille F1-5-01 regroupe également des échantillons de verres dits de laboratoire fabriqués pour les besoins de la R&D en vitrification et comportement à long terme

Les colis PIVER, produits entre 1969 et 1980, contiennent en majorité des déchets vitrifiés issus du traitement de combustibles UNGG. Ils sont conditionnés dans des conteneurs en acier inoxydable présentant un même diamètre mais des hauteurs différentes. Leur volume est de l'ordre de 60 litres. (Figure 2.1-1). Ils contiennent une masse de verre variant entre 15 et 106 kilogrammes. Suivant une hypothèse du CEA, ces conteneurs devraient être regroupés par deux dans un étui en acier inoxydable constituant un nouveau colis primaire.

Compte tenu de leur date de production, l'activité radiologique des colis a considérablement décru. Elle reste néanmoins dominée par le strontium 90 et le césium 137.

Les déchets vitrifiés AVM résultant du traitement des combustibles usés de réacteurs UNGG sont conditionnés dans un conteneur en acier inoxydable (Figure 2.1-2). Le volume du conteneur est de 175 litres, leur masse moyenne est de 410 kilogrammes (dont 360 kilogrammes de déchet vitrifié).

Les colis de verres UMo (CSD-U) correspondent à la vitrification, dans l'atelier R7, de solutions de produits de fission et d'actinides mineurs issues de combustibles UMo (alliage uranium molybdène) et MoSnAl (alliage molybdène, étain, aluminium) utilisés dans des réacteurs de la filière UNGG. Cette opération a commencé en 2012[10],

Ces déchets sont conditionnés dans un conteneur en acier inoxydable identique aux CSD-V (voir infra).

Figure 2.1-1 Colis HA « PIVER »

Figure 2.1-2 Colis HA « AVM »

[10] Le conditionnement des solutions UMo a nécessité le développement d'une technique de vitrification spécifique utilisant un « creuset froid ».

2.1.2 Productions actuelles et futures de déchets HA vitrifiés (famille F1-3-01)

Les solutions de produits de fission issues notamment du traitement de combustibles REP UOX sont conditionnées depuis 1989 dans l'atelier R7 et depuis 1992 dans l'atelier T7 sous forme de verre dans un conteneur en acier inoxydable dit CSD-V[11] de volume 180 litres (Figure 2.1-3).

La production et le conditionnement des déchets interviennent après une durée moyenne d'entreposage des combustibles de 10 ans après leur déchargement des réacteurs. La production de cette famille de colis (F1-3-01) est régulière dans le temps.

Le strontium 90 et le césium 137 sont à l'origine d'un fort dégagement thermique, qui décroît progressivement dans le temps (Figure 2.1-4). Le débit de dose de ces colis est aussi très élevé : le débit d'équivalent de dose β-γ au pseudo-contact (5 cm) sera d'environ 230 $Sv.h^{-1}$ après 60 ans d'entreposage.

Certains CSD-V prévus d'être produits à l'avenir se caractérisent par une concentration supérieure en actinides, particulièrement en américium 241, qui leur confère une décroissance thermique moins rapide dans le temps (cas notamment des déchets issus du traitement différé des combustibles MOX, en mélange avec des combustibles UOX et URE[12]).

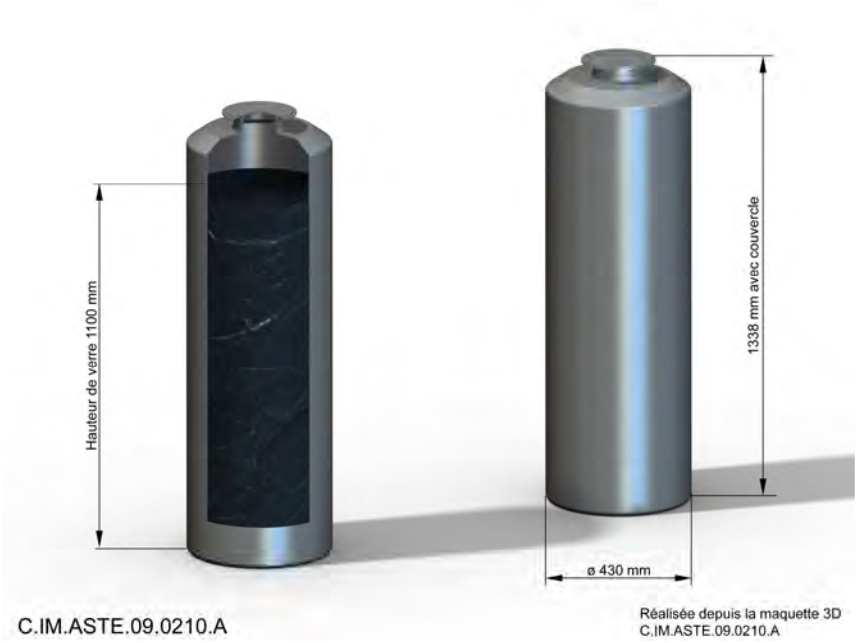


Figure 2.1-3 Colis HA « CSD-V » (La Hague)

[11] Conteneur standard de déchets vitrifiés. Le déchet vitrifié représente un volume d'environ 0,15 m^3, sa masse moyenne est d'environ 400 kg.
[12] Les combustibles URE utilisent l'uranium recyclé.

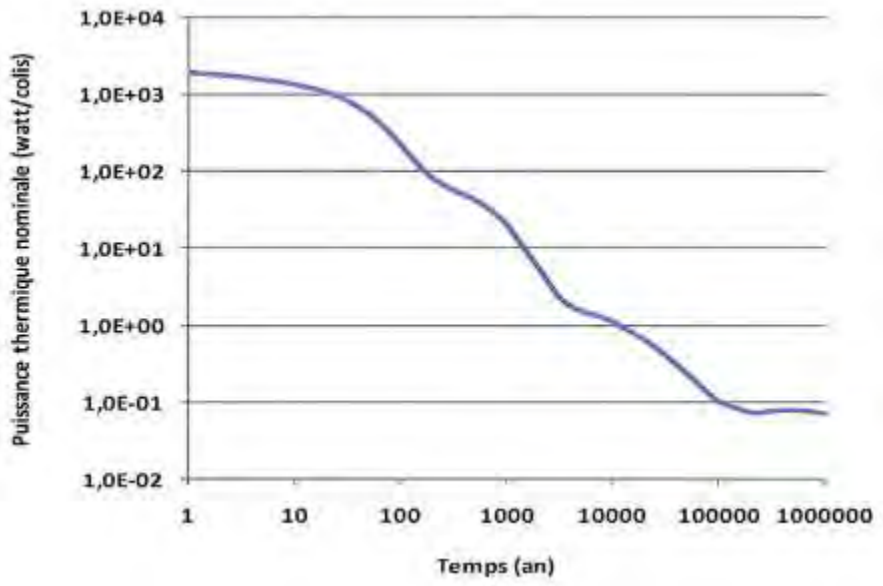


Figure 2.1-4 Décroissance dans le temps de la puissance thermique des CSD-V produits par l'usine de La Hague

2.1.3 Combustibles usés EL4 (famille F1-5-02)

Les combustibles issus du réacteur à eau lourde 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.

La majorité des grappes de combustibles EL4 est actuellement conditionnée dans des conteneurs (ou étuis) en acier inoxydable « AA281 » ([13]) regroupant chacun deux grappes placées l'une sur l'autre. Leur puissance thermique est faible (environ 7 watts par conteneur).

2.1.4 Déchets HA divers (familles F1-3-03, F1-3-04, F1-3-05)

Les autres déchets rattachés à la catégorie HA sont :

- des déchets de maintenance d'atelier de vitrification (F1-3-03) ;
- des capsules de titanate de strontium qui ont été utilisées dans l'atelier ELAN IIB de La Hague pour fabriquer des sources scellées de strontium 90 et de césium 137 (F1-3-04) ;
- des déchets vitrifiés issus des colonnes d'élution d'ELAN IIB (F1-3-05) ;
- des sources radioactives diverses (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{238}Pu) entreposées sur différents sites.

2.2 Colis de déchets MAVL

Les déchets MAVL se caractérisent par une activité β-γ faible ou moyenne, et, en conséquence, par un dégagement thermique négligeable ou faible. Ils représentent le plus grand nombre de colis, ainsi qu'une grande diversité de conditionnement. Une partie des colis de déchets MAVL peuvent générer de l'hydrogène gazeux par radiolyse de l'eau[14] ou des matières organiques qu'ils contiennent. Certains de ces colis émettent aussi des radionucléides gazeux.

[13] Le conteneur AA281 a un diamètre de 105 mm et une longueur de 1 100 mm.
[14] L'eau est généralement contenue dans les matrices de blocage à base de liant hydraulique.

2.2.1 Déchets MAVL conditionnés sur le site de La Hague (Areva)

Les déchets MAVL conditionnés ou envisagés d'être conditionnés sur le site Areva de La Hague comprennent :

- des déchets directement issus des combustibles usés traités antérieurement dans l'usine UP2-400, puis dans les usines UP2-800 et UP3. Il s'agit des éléments de structure des assemblages combustibles, c'est-à-dire dans le cas des assemblages REP : (i) des gaines des crayons combustibles, récupérées sous la forme de tronçons d'environ 3 cm de longueur, dans lesquelles le matériau nucléaire a été extrait par dissolution dans l'acide, (ii) des pièces (embouts) situées aux deux extrémités de l'assemblage combustible et autres accessoires telles que les grilles ;
- des déchets liés à l'usage et au démantèlement des installations de traitement, constitués des déchets de maintenance et de démontage des équipements (déchets technologiques), des déchets de traitement des eaux de piscines et des résidus de traitement chimique des effluents radioactifs.

Les déchets technologiques alpha résultant d'opérations effectuées en présence du plutonium extrait des combustibles constituent une catégorie particulière.

2.2.1.1 Déchets de structure et technologiques compactés (familles F2-3-02)

Depuis 2002, les déchets de structure des assemblages combustibles sont compactés et conditionnés dans des conteneurs standard (CSD-C[15]) dans l'atelier de compactage des coques « ACC » de La Hague.

Pour leur conditionnement, les déchets sont placés dans des étuis métalliques dans lesquels ils sont séchés et compactés ; les galettes ainsi obtenues sont empilées dans le conteneur CSD-C.

La géométrie externe de ce conteneur est proche de celle des CSD-V (volume de 180 litres, diamètre de 430 mm, hauteur de 1 335 mm, Figure 2.2-1). Le conteneur est constitué d'acier inoxydable. La masse des CSD-C pleins est d'environ 700 kg.

La majorité des colis produits actuellement contient des galettes de déchets de structure ; une faible proportion d'entre eux contient un mélange de galettes de déchets de structure et de galettes de déchets technologiques métalliques.

Le couvercle du conteneur est muni d'une cartouche poreuse en acier inoxydable frité, destinée à l'évacuation d'hydrogène formé par radiolyse de l'eau résiduelle dans le colis ou de gaz radioactifs. Néanmoins, dès lors que le CSD-C ne reçoit pas de déchets organiques, la quantité d'hydrogène attendue est très faible.

La puissance thermique des CSD-C contenant des déchets de structure REP UOX est en moyenne de l'ordre d'une quinzaine de watts par colis à la production. Elle est due essentiellement au cobalt 60, et diminue dans le temps avec la décroissance radioactive de ce radionucléide (Figure 2.2-2).

[15] Conteneurs standard de déchets compactés.

Figure 2.2-1 Conteneur de déchets de structure ou technologiques compactés (CSD-C)

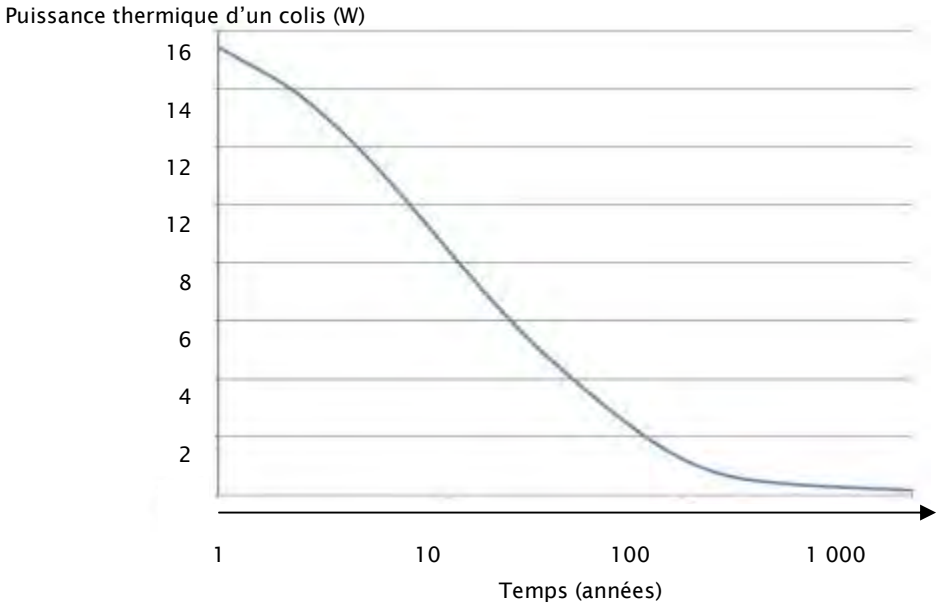


Figure 2.2-2 Décroissance de la puissance thermique des colis CSD-C dans le temps

2.2.1.2 Déchets de structure cimentés (famille F2-3-01)

A compter du démarrage des ateliers de cisaillage-dissolution T1 et R1 (respectivement en 1990 et 1994) et jusqu'en 1995, le mode de conditionnement des déchets de structure des assemblages combustibles (coques et embouts) consistait en une cimentation directe dans des fûts en acier inoxydable ; il a ensuite été remplacé par le compactage décrit plus haut. Ces colis sont regroupés dans la famille F2-3-01.

Les déchets séparés lors du cisaillage des assemblages combustibles (d'une part les coques et d'autre part les embouts) subissaient des traitements spécifiques de décontamination, jusqu'à leur arrivée au conditionnement où ils étaient mélangés dans un même fût. Les fûts remplis de coques et d'embouts étaient ensuite envoyés vers un poste de cimentation où s'effectuait l'injection d'un coulis de ciment.

Les fûts de déchets de structure cimentés sont de dimensions relativement grandes : volume de 1 500 litres, diamètre extérieur de 1 130 mm ; hauteur extérieure de 1 709 mm. La masse totale du colis (conteneur + déchets + matrice) est en moyenne de 3 540 kg.

2.2.1.3 Déchets solides d'exploitation cimentés, en conteneurs amiante ciment ou béton fibré (familles F2-3-07 et F2-3-08)

Des déchets technologiques solides produits dans le cadre de l'exploitation des différents ateliers de l'usine de La Hague sont collectés dans des étuis métalliques, des poubelles en polyéthylène ou des fûts métalliques. Ces étuis, poubelles et fûts sont ensuite transférés vers l'atelier AD2, placés dans des conteneurs cylindriques et bloqués dans un liant hydraulique ou du béton fibres. Des conteneurs amiante-ciment (CAC) ont été utilisés de 1990 à mars 1994, puis remplacés par des conteneurs en béton de fibres (CBF-C'2). Les emballages CAC et CBF-C'2 sont de même géométrie : volume 1,18 m^3, diamètre 1 000 mm, hauteur 1 500 mm (Figure 2.2-3). Les masses des colis varient de 1 320 à 3 080 kg. Le débit d'équivalent de dose β-γ au pseudo-contact (5 cm) de ces colis est de l'ordre de 0,1 $Sv.h^{-1}$ en moyenne (jusqu'à 1 $Sv.h^{-1}$). Ils ne sont pas thermiques.

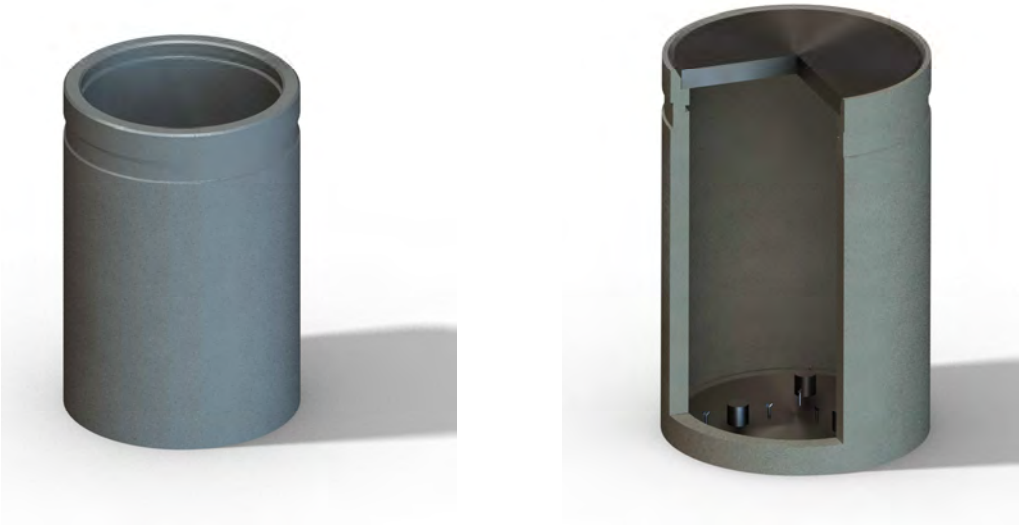


Figure 2.2-3 Conteneur en béton fibré ou en amiante-ciment pour déchets technologiques

2.2.1.4 Déchets de procédé cimentés (famille F2-3-13)

Différents déchets produits pendant l'exploitation de l'atelier HAO[16] de La Hague (fines, résines…), actuellement entreposés dans le silo de cet atelier, font l'objet d'un projet de conditionnement consistant en une cimentation dans un fût en acier inoxydable dit « ECE[17] ».

Ce conteneur cylindrique en acier est géométriquement similaire au fût de déchets de structure cimentés.

2.2.1.5 Résidus issus d'effluents liquides (familles F2-3-04, F2-3-05, F2-3-12 et F2-3-11)

Des effluents liquides radioactifs sont générés à différentes étapes du traitement des combustibles et lors d'interventions menées sur les matériels et les installations (décontaminations…). Ces effluents sont collectés et traités (décontaminés) à l'aide de réactifs chimiques spécifiques dans des stations de traitement. Le déchet résiduel est récupéré sous la forme de boues.

[16] HAO : Haute activité oxyde
[17] Les fûts « ECE » ont été utilisés pour l'entreposage sous eau de coques et embouts issus du traitement de combustibles dans les ateliers R1/T1 jusqu'à leur reprise progressive par compactage dans l'atelier ACC.

Dans la station de traitement STE3 de La Hague, démarrée en 1989, les boues produites ont été conditionnées sous la forme d'un enrobé bitumineux, coulé dans des fûts en acier inoxydable de volume 222 litres ; Figure 2.2-4). Ces colis constituent la famille F2-3-04.

Les boues issues des effluents produits et traités chimiquement dans la station STE2, de 1966 à 1990, ont été progressivement entreposées dans des cuves et silos de l'atelier, en attente de conditionnement.

Une reprise de ces boues avec un bitumage a été initiée en 2002 (famille F2-3-05), puis arrêtée depuis. Les boues de STE2 restant en attente de conditionnement feront l'objet d'un procédé alternatif au bitumage, aujourd'hui à l'étude. Areva retient l'hypothèse d'un compactage des pastilles de boues séchées et de leur conditionnement dans des fûts en acier inoxydable de 268 litres (famille F2-3-12).

Le débit d'équivalent de dose β-γ au pseudo-contact (5 cm) de colis de boues bitumées STE3 est de l'ordre de 0,5 sievert par heure. Leur puissance thermique est très faible.

Les effluents de rinçage de l'usine UP2-400 font l'objet d'une vitrification par creuset froid (F2-3-11). Cette production a commencé sur l'atelier R7 après la mise en actif du creuset froid. Elle accompagne la mise à l'arrêt définitif de l'usine UP2-400 et se prolongera avec celle des usines UP2-800 et UP3 après 2040. Les effluents vitrifiés sont coulés dans des conteneurs CSD-B (Figure 2.1-3) géométriquement comparables aux CSD-V. Ce mode de conditionnement apporte de nombreux avantages, particulièrement en situation de stockage.

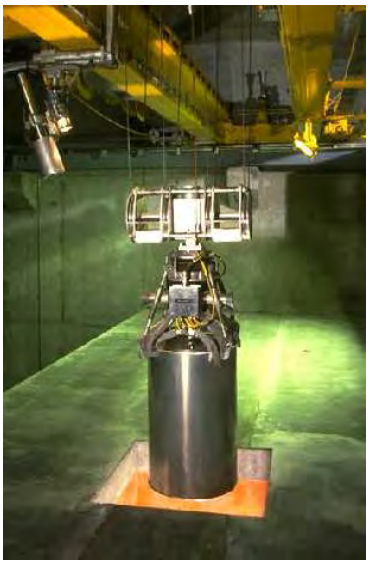


Figure 2.2-4 Conteneur de boues bitumées du site de La Hague (STE2 et STE3)

2.2.1.6 Déchets technologiques alpha (famille F2-3-10)

Les déchets technologiques dits alpha sont essentiellement contaminés par du plutonium lors des opérations de fabrication des combustibles MOX ou de traitement 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. Areva procède au regroupement de ses déchets technologiques alpha sur le site de La Hague.

Un procédé de conditionnement envisagé par Areva consisterait à compacter les déchets qui sont actuellement placés dans des fûts métalliques en galettes cylindriques, les galettes résultant du compactage étant ensuite introduites dans un étui interne placé dans un conteneur en acier inoxydable d'un volume de 233 litres.

De tels colis pourront présenter un dégagement d'hydrogène dû à la radiolyse des déchets organiques et des poches en vinyle qu'ils contiennent. Ce dégagement devrait décroître progressivement dans le temps avec l'épuisement des matières radiolysables à proximité des radionucléides émetteurs alpha, justifiant une phase d'entreposage avant stockage.

Des études de R&D sur des procédés d'incinération/fusion/vitrification, alternatifs au compactage ont été engagées.

2.2.2 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Marcoule (CEA)

Comme à La Hague, les déchets MAVL conditionnés à Marcoule comprennent des déchets de structure de combustibles, des déchets technologiques liés à l'usage des installations, ainsi qu'à leur démantèlement, et enfin des résidus de traitement chimique des effluents radioactifs (issus de l'exploitation et du démantèlement).

2.2.2.1 Déchets de structure de combustibles (familles F2-4-07, F2-4-09 et F2-4-14)

Les déchets de structure des combustibles UNGG traités dans l'usine UP1 constituent un ensemble important de déchets MAVL de Marcoule. Ces déchets sont aujourd'hui entreposés dans des fosses des ateliers de dégainage de G1[18], G2/G3[19] et MAR 400. Le démantèlement de ces installations implique une reprise et un conditionnement des déchets. On distingue les déchets de structure magnésiens et les déchets de structure métalliques non magnésiens.

La reprise des déchets de structure métalliques non magnésiens (famille F2-4-07) est prévue à l'horizon 2017. Ils seront cimentés dans des fûts en acier inoxydable de 380 litres. Il est à noter que le même conditionnement est prévu pour les déchets solides MAVL qui seront générés par le démantèlement des réacteurs CELESTIN de Marcoule.

La puissance thermique unitaire de ces colis de déchets est estimée 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 est relativement élevé.

La reprise des déchets de structure magnésiens (famille F2-4-09) est prévue débuter également à l'horizon 2017. Certains de ces déchets seront immobilisés dans des fûts en acier inoxydable de 220 litres au moyen d'une matrice, d'autres seront placés dans des fûts en acier non allié de 118 litres qui seront compactés et bloqués dans des fûts en acier inoxydable de 220 litres. La matrice inerte de blocage est en cours d'étude.

Des déchets de structure MAVL variés, issus du traitement de combustibles irradiés de réacteurs REP, de couvertures fertiles radiales de RAPSODIE, etc. dans les chaînes de « Traitement Oxydes Pilote » (TOP) et « Traitement Oxydes Réacteurs » (TOR) sont entreposés dans l'Atelier pilote de Marcoule (APM[20]).

A l'horizon 2017, le CEA envisage de conditionner la part la moins irradiante de ces déchets de structure dans des fûts de 380 litres (famille F2-4-14 pour partie). Les déchets de structure les plus irradiants et les déchets de démantèlement des chaînes TOP et TOR (famille F2-4-14 pour partie) seront placés dans des conteneurs en acier inoxydable en vue d'un entreposage dans une installation d'entreposage en projet dénommée DIADEM[21] (voir le chapitre 5).

---

18 Réacteur UNGG n° 1.
19 Réacteurs UNGG n° 2 et 3.
20 L'APM permis de tester et de mettre en œuvre des procédés de traitement de combustibles à une échelle pré-industrielle.
21 Entreposage de déchets irradiants ou alpha et de démantèlement

Figure 2.2-5 Fût de 380 litres, dit « EIP »

2.2.2.2 Déchets solides d'exploitation et de démantèlement (familles F2-4-05, F2-4-10 et F2-4-11, F2-4-12, F2-4-15)

Les déchets d'exploitation et de démantèlement des installations du site de Marcoule et d'autres sites du CEA, particulièrement leur mode de conditionnement en vue de l'entreposage, se distinguent selon les installations qui les ont produits.

Déchets de l'Atelier de vitrification de Marcoule

Depuis 1978, les déchets technologiques solides liés à l'exploitation de l'AVM, constitués d'appareillages, d'outillages et de pièces diverses (famille F2-4-05) sont déposés dans un conteneur en acier inoxydable, dit CDT, de géométrie similaire à celle des conteneurs de déchets HA vitrifiés AVM (175 litres, Figure 2.1-2). La masse des CDT est en moyenne de 160 kilogrammes, pouvant atteindre 320 kilogrammes ([22]). Ces colis ne sont pas thermiques, leur niveau d'irradiation est d'environ 0,05 $Sv.h^{-1}$.

Les déchets de démantèlement de l'AVM seront placés dans ce même type de conteneur.

Déchets du réacteur Phénix

Les déchets de démantèlement du cœur du réacteur Phénix (assemblages en acier, éléments de support, protections neutroniques latérales…) ainsi que des déchets divers issus du traitement du sodium du réacteur seront placés dans des conteneurs en acier inoxydable destinés à la future installation d'entreposage DIADEM (famille F2-4-12). Ici encore les hypothèses utilisées dans la suite concernant les colis DIADEM (toutes familles confondues) ne préjugent pas de leur acceptabilité en stockage en l'état (volume vide résiduel…).

Les aiguilles de commande en carbure de bore du réacteur Phénix (et celles provenant des réacteurs Rapsodie et Superphénix), susceptibles de contenir du sodium résiduel, seraient conditionnés dans des conteneurs en acier inoxydable de 1,5 m^3, à l'étude (famille F2-4-15). L'acceptabilité en stockage de ces colis de déchets renverra notamment aux quantités résiduelles de sodium (réactivité chimique).

[22] Ces colis ne comprennent pas de matrice d'immobilisation des déchets.

Déchets de l'usine de traitement UP1 et des ateliers de dégainage (MAR400)

Les déchets pulvérulents anciens de l'usine de traitement UP1 actuellement en cours de démantèlement et produits par différents procédés (système de filtration de piscines, graphite pulvérulent du dégainage des combustibles des réacteurs UNGG, boues de décantation) seront repris à l'horizon 2017 et conditionnés par cimentation dans des fûts en acier inoxydable de 380 litres (famille F2-4-10 pro parte).

Une production potentielle d'hydrogène par radiolyse de l'eau du béton de la matrice est à prendre en compte. La masse des colis finis est de 720 kilogrammes en moyenne.

Les déchets technologiques de l'usine UP1 (famille F2-4-11) sont constitués d'un mélange de matériaux métalliques et organiques. Ils proviennent de l'exploitation et de la maintenance des ateliers et à l'avenir d'opérations de démantèlement. L'hypothèse de conditionnement actuellement retenue par le CEA est une cimentation des déchets technologiques à spectre radioactif principalement bêta-gamma dans des fûts de 380 litres, comme les déchets pulvérulents.

Un relâchement d'hydrogène est à attendre, dû à la radiolyse de la matière organique et de l'eau du béton de la matrice.

Les déchets de provenance similaire mais à spectre à dominante alpha seront conditionnés par cimentation en conteneur acier de 870 litres et transportés pour entreposage vers le centre de Cadarache (F2-5-04). Des fûts de 200 litres en acier contenant de déchets solides alpha, entreposés dans la zone nord CDS de Marcoule, seront placés dans des conteneurs béton de 500 litres puis également expédiés à Cadarache pour entreposage.

Déchets divers produits sur d'autres centres CEA

Aux déchets ci-avant produits ou déjà présents sur le site de Marcoule, s'ajouteront des déchets divers issus de l'exploitation et du démantèlement d'installations d'autres centres du CEA, que ce dernier prévoit de transférer sur le site de Marcoule pour les entreposer dans l'installation DIADEM à l'instar de la famille F2-4-12 (réacteur RAPSODIE, fosses de l'INB 56 du CEA Cadarache, réacteur JULES HOROWITZ, centres CEA de Fontenay-aux-Roses, Saclay et Grenoble).

Au sein même de l'installation qui les produit, le CEA prévoit de placer ces déchets dans des conteneurs en acier inoxydable d'un diamètre extérieur de 498 mm en cours d'étude, compatibles avec les spécifications de DIADEM.

2.2.2.3 Résidus issus d'effluents liquides (familles F2-4-03, F2-4-04 et F2-4-13)

De 1966 à 1995, la station de traitement des effluents liquides de Marcoule (STEL) a produit des colis de boues enrobées dans le bitume, dont l'enveloppe est un fût en acier non allié de 230 litres (famille F2-4-04). Les colis ont été entreposés dans 35 fosses de la zone nord du site de Marcoule puis dans les casemates 1 à 13 de la zone sud du site.

De 2000 à 2006, une opération de reprise et de reconditionnement des colis de déchets entreposés dans les fosses nord a été réalisée. Les fûts ont été retirés, contrôlés et placés en sur-fûts en acier inoxydable de 380 litres pour entreposage dans l'EIP. Sur la base des hypothèses actuelles, le CEA a rattaché la totalité de ces colis à la catégorie FAVL. Il est à noter que ce rattachement ne préjuge pas de la faisabilité d'un co-stockage de ces déchets avec d'autres déchets FAVL (déchets radifères notamment). Par précaution, l'ensemble des enrobés bitumineux FAVL de Marcoule sont pris en compte dans le projet Cigéo au titre de réserves. L'étude de plusieurs scénarios possibles de gestion de ces enrobés devrait se poursuivre d'ici 2015, en concertation entre le CEA et l'Andra.

Depuis 2007, les opérations de reprise continuent sur les casemates 1 et 2 de la zone sud. Les colis FAVL ou MAVL retirés sont placés dans des sur-fûts en acier inoxydable de 380 litres. A partir de 2017, les opérations de reprise devraient se poursuivre avec les fûts de boues bitumées des casemates 3 à 13.

Le CEA prévoit qu'au final 7 000 des fûts rattachés à la famille MAVL F2-4-04 auront été placés en sur-fûts de 380 litres. Dans le scénario de référence du CEA, les autres fûts de cette famille extraits des casemates 3 à 13 sont considérés placés directement en conteneur de stockage (voir le chapitre 5).

En 1995 et 1996, des colis de boues enrobées dans le bitume constitués d'une enveloppe en acier non allié de 230 litres ont été produits par la STEL de Marcoule conformément à la spécification 300 AQ 048 (famille F2-4-03 pro parte).

Depuis 1996, la production de la STEL continue conformément à cette spécification en utilisant des fûts en acier inoxydable de 230 litres. (famille F2-4-03 pro parte). Ces fûts sont entreposés dans la casemate n° 14.

A partir de 2015, la STEL sera remplacée par la station de traitement des effluents de Marcoule (installation STEMA) où les boues seront cimentées dans des fûts en acier inoxydable de 380 litres. La part relevant de la catégorie MAVL est rattachée à la famille F2-4-10 pro parte.

Les effluents de rinçage générés pour la mise à l'arrêt définitif de l'usine UP1sont vitrifiés dans l'atelier de vitrification de Marcoule (AVM) dans les mêmes conteneurs que les déchets vitrifiés HA de l'AVM (Figure 2.1-2). Ces colis MAVL, dont la production s'est achevée fin 2012, constituent la famille F2-4-13.

Figure 2.2-6 Colis de boues bitumées reconditionné en sur-fût inox de 380 litres (à gauche), colis de boues bitumées en conteneur inox de 230 l (à droite)

2.2.3 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Cadarache (CEA)

Le centre CEA de Cadarache a en charge de conditionner et d'entreposer les déchets produits sur le site même et sur d'autres centres du CEA ; cela concerne l'assainissement des sites de Fontenay-aux-Roses et Grenoble ainsi que des déchets provenant des centres de Saclay, Marcoule, Valduc et Bruyères-le-Châtel.

Les principaux conditionnements réalisés actuellement à Cadarache consistent en des conteneurs métalliques de 870 litres pour les déchets solides faiblement irradiants et des conteneurs en acier de 500 litres pour les déchets moyennement irradiants. Il s'y ajoute des boues de filtration faiblement irradiantes cimentées en conteneurs métalliques, surcolisés en conteneurs béton de 500 litres. Enfin, diverses productions historiques sont à gérer : déchets divers en conteneurs de grandes dimensions, sulfates de plomb radifères, blocs sources.

2.2.3.1 Concentrats, déchets solides d'exploitation et de démantèlement faiblement irradiants, en conteneurs de 870 litres (familles F2-5-03 et F2-5-04)

Entre 1972 et 1982, des concentrats d'évaporation de la STE de l'INB 37 ont été cimentés dans des fûts an acier de 700 litres qui ont ensuite été reconditionnés dans un conteneur en acier non allié de 870 litres dit « réhaussé » par blocage à l'aide d'un mortier (famille F2-5-03).

Depuis 1972, la station de compactage-cimentation de l'INB 37 conditionne les déchets solides d'exploitation ou de démantèlement des centres civils et militaires du CEA, à spectre alpha ou béta-gamma faiblement irradiants. Les déchets sont composés de métaux et de matières plastiques. Les déchets compressibles sont compactés dans des fûts en acier non allié de 100 litres ou de 200 litres. Les galettes de déchets compactés ou les déchets peu compressibles sont déposés dans des conteneurs de 870 litres en acier non allié où ils sont bloqués (famille F2-5-04 pro parte, Figure 2.2-7 ci-après). Deux matrices de conditionnement des déchets ont été utilisées successivement depuis le démarrage de la production de ces colis : un ciment-bitume puis à partir de 1990 un liant hydraulique,

En plus des déchets d'exploitation du site de Cadarache, la cimentation en conteneurs de 870 litres concerne notamment des déchets technologiques métalliques et organiques provenant du centre de Valduc ainsi que des déchets issus de la reprise de fûts anciens entreposés dans l'installation Pégase de Cadarache (famille F2-5-04 pro parte).

Les têtes de paratonnerres et radium et mixtes radium-américium collectées par l'Andra sont aujourd'hui compactées et conditionnées en fûts de 870 litres par le CEA. Le CEA envisage également de conditionner ainsi des sources scellées usagées (alpha, neutrons…).

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 une production d'hydrogène par radiolyse des matières organiques et de la matrice de conditionnement.

Comme indiqué plus haut, le conditionnement en fûts de 870 litres sera aussi utilisé pour des déchets à spectre alpha du site de Marcoule. Après conditionnement à Marcoule, ces colis de déchets seront transportés à Cadarache pour y être entreposés avec les colis de 870 litres produits sur le site.

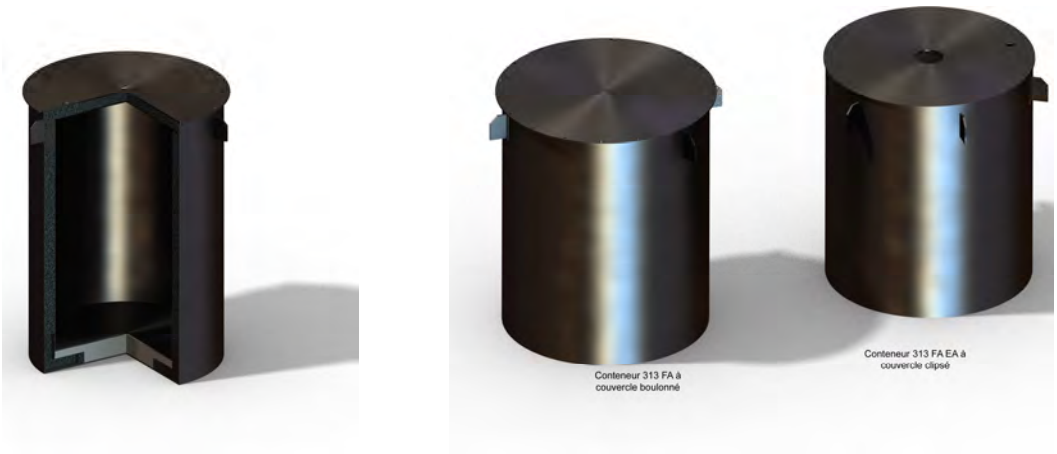


Figure 2.2-7 Fûts en acier non allié de 870 litres pour déchets faiblement irradiants

2.2.3.2 Déchets solides moyennement irradiants en conteneurs en acier de 500 litres (famille F2-5-05)

Depuis 1970, la station de compactage-cimentation de l'INB 37 conditionne les déchets solides d'exploitation, de maintenance ou de démantèlement moyennement irradiants des centres civils et militaires du CEA dans des conteneurs en acier de 500 litres. Les déchets sont placés dans des fûts métalliques de différentes capacités et compactés. Les galettes de déchets compactées sont ensuite bloquées dans le conteneur de 500 litres.

Comme pour les colis de 870 litres, des évolutions sont intervenues depuis le démarrage de la production des colis de 500 litres qui concernent (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 2.2-8).

Le CEA prévoit également de conditionner dans des conteneurs en acier de 500 litres des déchets solides non compactables qui seront placés dans des paniers et bloqués par une matrice cimentaire.

Les masses des colis produits 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.

Une production d'hydrogène, par radiolyse des matières organiques et de la matrice de conditionnement, est aussi à considérer. Le débit d'équivalent de dose β-γ au pseudo-contact (5 cm) des colis est de l'ordre de 0,2 $Sv.h^{-1}$.

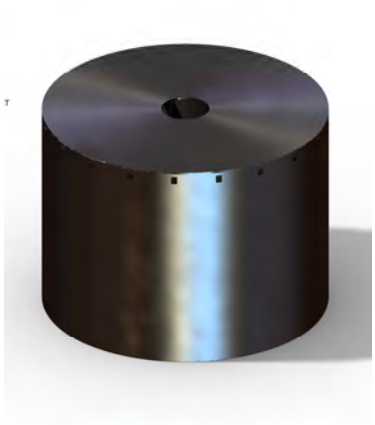


Figure 2.2-8 Fûts de 500 litres en acier non allié

2.2.3.3 Boues de filtration cimentées faiblement irradiantes en conteneurs béton de 500 litres (famille F2-5-02)

A partir de 1970, la STE[23] de l'INB 37 a conditionné des boues de filtration par cimentation dans des fûts en acier non allié de 223 litres. Ces derniers sont placés dans des conteneurs en béton de 500 litres (Figure 2.2-9). Jusqu'en 1996, les fûts étaient bloqués à l'aide d'un mortier à l'intérieur des conteneurs béton. Aujourd'hui, ils ne le sont plus ; cela ouvre la possibilité d'une reprise des fûts pour un autre mode de recolisage en vue du stockage[24]. Cette production de colis s'est arrêtée en 2012.

Des fûts métalliques de concentrats d'évaporation cimentés produits entre 1972 et 1995 ont aussi été surcolisés en conteneurs béton de 500 litres.

[23] La STE sera remplacée par l'atelier de gestion avancée et de traitements des effluents : AGATE. Sur la base des hypothèses CEA, aucun des colis produits ne relèvera de la catégorie MAVL.
[24] On retiendra dans la suite un volume de conteneur primaire de 500 litres pour l'ensemble de la famille F2-5-02.

Les masses des conteneurs béton varient entre 770 et 920 kilogrammes.

On considère ici aussi une production potentielle d'hydrogène, par radiolyse de l'eau de la matrice. Ces colis ne sont pas ou peu irradiants.

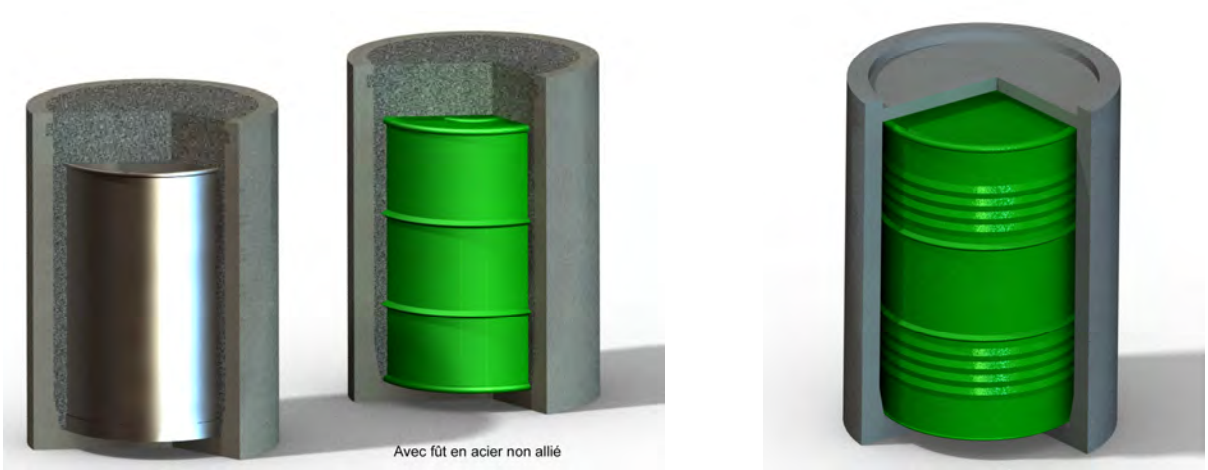


Figure 2.2-9 Coques béton de 500 litres contenant un fût de déchets

2.2.3.4 Déchets divers cimentés en conteneurs béton de grandes dimensions (famille F2-5-06)

De 1964 à 1987, la station de traitement des déchets solides de l'INB 37 a traité des déchets divers issus d'opérations de maintenance ou de démantèlement faiblement contaminés (boues, déchets solides). Les déchets solides ont été bloqués dans une matrice ciment-bitume et les boues ont été mélangées à du ciment à l'intérieur de conteneurs en béton de 1 000 litres (Figure 2.2-10).

Pendant la même période, des déchets solides divers, métalliques et organiques, ont été conditionnés à l'intérieur de conteneurs en béton de 1 800 litres (Figure 2.2-11). Ils ont été bloqués au moyen d'une matrice ciment-bitume ou d'une matrice cimentaire.

En 1994, ces conteneurs en béton ont été surcolisés dans des conteneurs en acier non allié, conduisant alors à un volume de colis de 2 000, 3 200 ou 3 800 litres. Les masses des colis finis varient entre 2,7 tonnes et 6,8 tonnes.

Les dimensions de ces colis de déchets sont susceptibles de les rendre dimensionnants pour les installations de Cigéo, malgré leur faible nombre. Une recherche d'optimisation d'ensemble pose la question d'une reprise de conditionnement avant l'expédition vers Cigéo qui permettrait de livrer des colis de gabarit réduit.

2.2.3.5 Sulfates de plomb radifères (famille F2-5-01)

Les sulfates de plomb radifères proviennent du traitement de minerai d'urano-thorianite dans l'usine du Bouchet du CEA.

Une partie de ces déchets a été placée dans des fûts en acier de 60 litres, puis mis dans des fûts anticorrosion de 120 litres. Il est prévu de les retirer des conteneurs en béton de 500 litres où ils sont actuellement placés, pour les placer dans des fûts en acier inoxydable de 380 litres similaires à ceux utilisés à Marcoule.

Une autre partie a été placée dans des fûts en acier non allié de 225 litres qui ont été reconditionnés par quatre dans des caissons métalliques eux-mêmes placés dans des conteneurs parallélépipédiques en béton de 5 m^3.

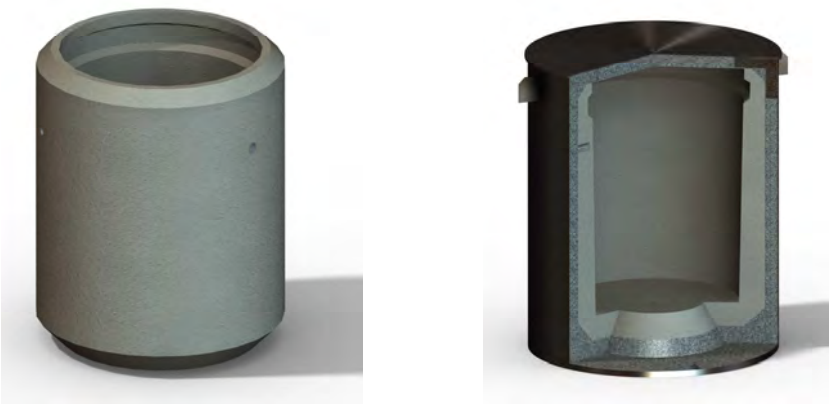


Figure 2.2-10 Conteneur béton de 1 000 litres (reconditionnée en conteneur métallique à droite)

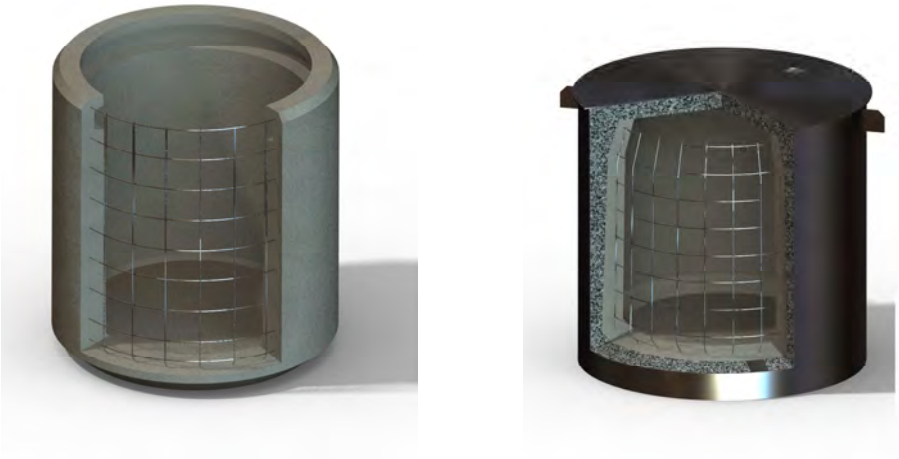


Figure 2.2-11 Conteneur béton de 1 800 litres (reconditionnée en conteneur en acier à droite)

2.2.3.6 Blocs sources (famille F2-9-01)

Le CEA entrepose à Cadarache 41 colis historiques de sources scellées usagées bloquées au moyen d'une matrice cimentaire dans des conteneurs en béton dits « blocs sources ». Ces "blocs-sources" (Figure 2.2-12) contiennent une grande diversité de sources scellées (radium 226, américium 241, cobalt 60, césium 137, tritium, strontium 90, neutroniques…).

Ces « blocs-sources » ont été reconditionnés dans des conteneurs en acier non allié (dimensions hors tout : diamètre = 1 780 mm, hauteur =1 513 mm). La masse des colis est comprise entre 6,0 et 9,2 tonnes.

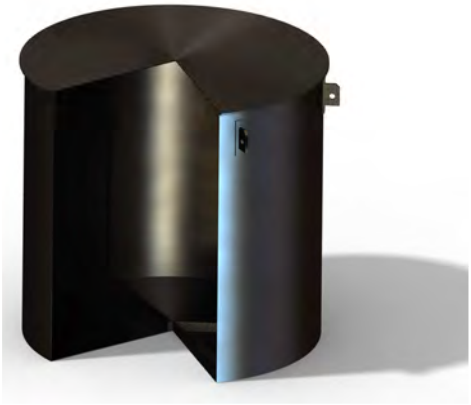


Figure 2.2-12 Blocs sources

2.2.3.7 Déchets à produire par ITER

Une partie des déchets que produira le réacteur expérimental ITER relèvera de la catégorie MAVL. Leur contenu en tritium devrait justifier une phase d'entreposage de décroissance de plusieurs décennies avant mise en stockage. Toutefois les déchets d'ITER ne sont pas pris en compte dans l'IN 2012 car cette installation n'était pas autorisée à fin 2010. Ils ne sont pas couverts par les études et recherches présentées dans ce bilan.

2.2.4 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Valduc (CEA)

Outre les déchets transférés à Cadarache pour conditionnement, le centre CEA de Valduc gère d'autres déchets MAVL conditionnés sur le site.

Les effluents très actifs provenant du recyclage du plutonium seront vitrifiés dans une installation actuellement en cours de construction sur le centre de Valduc. Après refroidissement, les « pots de fusion » seront placés par deux dans un conteneur en acier inoxydable standardisé de type CSD-C (volume de 0,183 litres, Figure 2.2-1). Cette production qui commencera à l'horizon 2020 correspond à la famille F2-6-03.

Des boues,des concentrats ou un mélange de boues concentrats produits à la Station de traitement des effluents de Valduc de 1984 à 1995 ont été enrobés dans un matériau à base de ciment et conditionnés dans des fûts en acier de 220 litres (famille F2-6-02). Ces colis de déchets sont expédiés à Cadarache pour entreposage.

Enfin les futurs déchets de déconstruction seront conditionnés après 2030 par cimentation dans des conteneurs en acier non allié de 870 litres.

2.2.5 Déchets MAVL d'exploitation et de déconstruction des réacteurs électronucléaires (EDF)

L'exploitation des réacteurs électronucléaires fait appel à différents dispositifs utilisés lors du démarrage ou pour le pilotage des réacteurs. Ces dispositifs doivent être remplacés après une certaine durée d'utilisation et deviennent alors des déchets d'exploitation. Dans les REP, ils sont composés principalement de grappes de commande et de grappes poisons et, dans une moindre mesure, de déchets divers tels que des grappes sources et des pièces métalliques. Lors du démantèlement, les équipements de pilotage se trouvant dans le cœur du réacteur deviennent aussi des déchets activés MAVL.

Une part importante de l'activité radiologique est due à des radionucléides formés par activation neutronique des éléments et impuretés constitutifs des matériaux, lors de leur séjour en réacteur. Les déchets activés sont très irradiants. Ils présentent aussi une exothermicité.

Celle-ci est due en partie au cobalt 60 comme dans le cas des déchets de structure, avec une décroissance rapide. Une autre part du dégagement thermique des déchets activés résulte de l'argent 108 m (période de 418 ans) ; la décroissance beaucoup plus lente de ce radionucléide n'en permet pas une gestion par une phase d'entreposage préalable au stockage.

Les déchets MAVL issus des cœurs de réacteur (famille F2-2-03) seront, éventuellement après découpage, bloqués par un mortier à base de ciment dans des paniers métalliques. EDF prévoit de déposer ensuite ces paniers dans un conteneur en béton armé « C1PG » d'un volume de 2 m³, au sein duquel les paniers seront calés par un coulis[25]. Ce conditionnement s'effectuera dans ICEDA[26], installation en cours de construction sur le site de Bugey[27].

Les déchets de l'AMI[28] de Chinon sont constitués de matériaux radioactifs variés, issus des réacteurs des filières UNGG et REP puis expertisés dans l'AMI. Ces déchets sont actuellement entreposés dans des puits de l'AMI. Ils seront conditionnés dans des conteneurs dont la géométrie reste à définir (famille DIV2).

2.3 Volumes en 2030 (IN 2012)

2.3.1 Colis de déchets HA

Le Tableau 2.3-1 estime les volumes des différentes familles de colis de déchets HA produits à l'horizon 2030.

Tableau 2.3-1 Volume en 2030 des colis HA sur les trois sites d'entreposage

Site	Puissance thermique	Description des familles de colis	Identifiant	Volume total (m³)
La Hague	Forte	Colis de déchets vitrifiés CSD-V	F1-3-01	4 530
	Faible à moyenne	Solutions molybdiques vitrifiées (UMo)	F1-3-02	180
		Déchets technologiques (R7)	F1-3-03	19
		Capsules de titanate de strontium	F1-3-04	1
		Déchets issus des colonnes d'élution d'Elan II B	F1-3-05	9
Cadarache		Etuis de combustibles usés EL4	F1-5-02	26
Marcoule		Colis de déchets vitrifiés PIVER	F1-5-01	17
		Colis de déchets vitrifiés AVM	F1-4-01	553

2.3.2 Colis de déchets MAVL

Le Tableau 2.3-2 estime les volumes des différentes familles de colis de déchets MAVL en 2030, en distinguant les productions en cours, en projet et celles qui sont aujourd'hui achevées.

[25] L'Andra a proposé à EDF d'examiner des possibilités d'adaptation du conditionnement en C1PG dans l'optique d'une diminution du volume final à stocker.
[26] Installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activés.
[27] La construction de cette installation a été interrompue suite à l'annulation du permis de construire. Sa mise en service est prévue actuellement en 2015.
[28] Atelier des matériaux irradiés

Tableau 2.3-2 Volume en 2030 des colis MAVL sur les cinq sites d'entreposage existants ou prévu

Site	Description des familles de colis	Identifiant	Volume total (m³)
Production de colis en cours			
La Hague	Colis de déchets compactés CSD-C (déchets de structure et technologiques)	F2-3-02	4 702
	Colis d'enrobés bitumineux produits à partir d'effluents traités dans STE3, en fûts inox de 220 l (boues bitumées)	F2-3-04	2 742
	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés, en conteneurs béton-fibres CBFC'2 (déchets technologiques)	F2-3-08	8 072
	Effluents de rinçage vitrifiés en conteneurs inox (CSD-B)	F2-3-11	101
Marcoule	Colis d'enrobés bitumineux (STEL) produits depuis 1995, (boues bitumées)	F2-4-03	911
	Fûts d'enrobés bitumineux[29] (STEL) produits avant 1995 (boues bitumées)	F2-4-04	6 667
	Colis de déchets solides d'exploitation de l'AVM, en conteneur inox (déchets technologiques)	F2-4-05	33
	Effluents de rinçage des cuves de solutions de produits de fission de Marcoule, vitrifiés en conteneurs inox	F2-4-13	29
Cadarache	Colis de boues de filtration cimentées en coques béton de 500 l	F2-5-02	1 929
	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés, faiblement irradiants, en fûts métalliques de 870 l	F2-5-04	5 597
	Colis de déchets solides d'exploitation moyennement irradiants en fûts acier de 500 l (déchets technologiques)	F2-5-05	1 632
Production de colis en projet - conditionnement de déchets existants			
La Hague	Boues de STE2 séchées et compactées	F2-3-12	3 866
Marcoule	Déchets de structure métalliques en fûts inox de 380 l	F2-4-07	273
	Déchets de structure magnésiens en fûts inox de 223 l	F2-4-09	1 642
	Déchets de procédé pulvérulents en fûts inox de 380 l ([30])	F2-4-10	963
	Déchets technologiques métalliques (et organiques) d'exploitation et de démantèlement, en fûts inox de 380 l	F2-4-11	332
	Déchets de structure et de démantèlement de l'APM	F2-4-14	167

[29] Cette famille correspond à la reprise et au reconditionnement de colis anciens
[30] Cette famille comprend le conditionnement de déchets existants et futurs.

Site	Description des familles de colis	Identifiant	Volume total (m³)
	Aiguilles des barres de commande des RNR	F2-4-15	19
Cadarache	Colis de sulfates de plomb radifères	F2-5-01	457
Valduc	Effluents radioactifs provenant du recyclage de Pu, vitrifiés	F2-6-03	40
Production de colis en projet - déchets à venir			
La Hague	Déchets technologiques contaminés en émetteurs alpha	F2-3-10	735
	Déchets pulvérulents cimentés en fûts inox dits « ECE »	F2-3-13	152
Marcoule	Déchets du cœur du réacteur Phénix	F2-4-12	138
Bugey	Déchets activés des réacteurs EDF hors déchets sodés, en conteneurs C1PG	F2-2-03	3 132
Production de colis achevée			
La Hague	Colis de coques et embouts cimentés en fûts métalliques de 1 500 l (déchets de structure)	F2-3-01	2 277
	Boues STE2 conditionnés dans une matrice bitumineuse, en fût inox 220 l (boues bitumées)	F2-3-05	75
	Colis de déchets solides d'exploitation, cimentés en conteneurs amiante ciment CAC (déchets technologiques)	F2-3-07	382
Cadarache	Fût de 700 litres de concentrats d'évaporation cimentés reconditionnés en conteneur métallique de 1 070 l	F2-5-03	44
	Coques béton (1 800 ou 1 000 litres) de déchets solides cimentés (ciment ou ciment-bitume)	F2-5-06	502
	Colis « blocs sources » cimentés en conteneurs béton / acier	F2-9-01	125
Valduc	Boues et concentrats cimentés, en fûts métalliques	F2-6-02	79
-	Déchets divers MAVL	DIV2	1 021

3

Analyse des capacités d'entreposage

3.1 Capacités existantes d'entreposage de colis de déchets HA-MAVL 52

3.2 L'expérience industrielle de l'entreposage de colis de déchets HA ou MAVL en France 66

3.3 L'expérience de l'entreposage à l'étranger 88

Les déchets HA et MAVL produits et conditionnés sont entreposés aujourd'hui sur les sites de La Hague, Marcoule, Cadarache et Valduc.

Les entrepôts existants, leurs extensions et les projets d'installations nouvelles offrent une capacité, qui permettra de gérer les productions de colis en cours et les productions de déchets à venir. Les entreposages les plus anciens de la première génération d'entrepôt, qui ont été exploités pendant 40 années ou plus sont progressivement remplacés par des installations nouvellement créées.

Dans certains entreposages, les capacités disponibles sont partagées entre plusieurs filières : HA-MAVL, MAVL/FA-VL ou MAVL/FMA-VC. Par ailleurs, une partie de la capacité de certains entrepôts exploités par Areva est occupée transitoirement par des déchets étrangers, qui sont progressivement réexpédiés aux clients d'Areva.

Les entrepôts existants présentent en général une durabilité prévisible d'une cinquantaine d'années, sans préjudice de possibles réévaluations dans le temps. Cela conduit à des dates potentielles de cessation d'exploitation vers 2040 ou 2050 pour les quatre installations construites depuis moins de 15 ans.

Ayant été conçus pour gérer les colis produits par un atelier particulier ou par un nombre limité d'ateliers, sur un site donné, les entrepôts existants ne peuvent recevoir qu'une seule ou qu'un nombre limité de familles de colis primaires. Ils sont ainsi relativement peu polyvalents vis-à-vis des caractéristiques des déchets qui peuvent y être accueillis.

L'expérience industrielle tirée de la réalisation et de l'exploitation des entrepôts existants en France est une donnée d'entrée pour la conception de nouvelles capacités d'entreposage. De surcroît, les techniques mises en œuvre en France se retrouvent couramment dans des installations d'entreposage exploitées dans d'autres pays.

Il est toutefois à noter que certaines techniques d'entreposage sont mises en œuvre industriellement à l'étranger tout en étant peu pratiquées en France. Il s'agit d'entreposage dans des emballages blindés également utilisés pour les transports, ou encore dans des structures en béton très modulaires. L'intérêt de ces techniques particulières et leur champ d'application méritent aussi d'être évalués.

Ce chapitre identifie et caractérise les installations existant en France d'entreposage de déchets HA ou MAVL conditionnés. Il en analyse les capacités volumiques au regard des productions passées et futures. Il présente les techniques qui ont été mises en œuvre et éprouvées dans ce cadre, ainsi que l'expérience de l'entreposage dans d'autres pays.

3.1 Capacités existantes d'entreposage de colis de déchets HA-MAVL

En application de l'arrêté du 9 octobre 2008 qui fait suite à la loi de programme du 28 juin 2006, les exploitants ont fourni des données sur les installations d'entreposage existantes dans le cadre de leurs déclarations pour les révisions successives en 2009 et 2012 de l'Inventaire national des matières et des déchets radioactifs. Ces données concernent le lieu d'entreposage, les familles de colis pour lesquelles l'installation d'entreposage a été conçue, avec mention des ateliers de fabrication, la capacité d'accueil totale, la date de mise en service et la durée prévisionnelle d'exploitation, la capacité utilisée à la date de référence de l'inventaire, soit au 31 décembre 2010 (IN 2012).

Les exploitants ont également indiqué (i) la date prévisionnelle à laquelle chaque installation d'entreposage cessera d'accueillir des colis en raison soit de l'arrêt de leur production, soit de la saturation de la capacité d'accueil, (ii) l'existence de moyens de désentreposage (manutention, transport) (iii) le programme envisagé le cas échéant pour l'extension de l'installation (dates de mise en service des extensions, capacités correspondantes).

L'étude exploratoire de scénarios de mise en stockage et l'analyse des besoins d'entreposage présentées en 2009 (chapitres 4 et 5) ont ainsi pris en compte des dates prévisionnelles pour la cessation définitive d'exploitation de chaque installation qui sera suivie, plusieurs années plus tard (typiquement cinq à dix ans) par sa mise à l'arrêt définitif.

La cessation définitive d'exploitation (CDE) d'un entreposage est la dernière phase de son exploitation pendant laquelle les colis de déchets et toutes les substances radioactives commencent à en être retirés de façon à pouvoir engager les opérations techniques préparatoires à la mise à l'arrêt définitif.

La mise à l'arrêt définitif (MAD) correspond à l'engagement des procédures administratives et des opérations techniques destinées à interrompre de façon progressive et irréversible le fonctionnement de l'installation en vue de sa déconstruction.

3.1.1 Entreposage des colis de déchets HA

3.1.1.1 Site de La Hague

Trois installations d'entreposage permettent de gérer sur le site de La Hague les colis de déchets vitrifiés, représentés principalement par les familles F1-3-01 et F1-3-02, toutes deux rattachées à la catégorie HA (CSD-V et CSD-U), ainsi que la famille F2-3-11 rattachée à la catégorie MAVL (colis d'effluents de rinçage vitrifiés CSD-B). Il s'agit d'une part des entrepôts attenants aux deux ateliers de vitrification R7 et T7[32], d'autre part de l' « Extension des entreposages des verres Sud-Est[33] » (E-EV-SE, Figure 3.1-1 page 54).

Cet ensemble dispose actuellement d'une capacité cumulée de 2 236 m^3, répartie en :

- 4 500 places (810 m^3) pour l'entrepôt de l'atelier R7 ;
- 3 600 places pour T7 (648 m^3);
- 4 320 places pour les deux modules existants d'E-EV-SE (778 m^3).

Les entrepôts des ateliers R7 et T7 ont été mis en service respectivement en 1989 et 1992 et les deux modules existants d'E-EV-SE sont opérationnels depuis 1996.

L'entreposage E-EV-SE est de conception modulaire. Une première extension appelée EEVLH est en cours de construction avec deux nouvelles fosses. La première sera mise en service en 2013 et apportera une capacité additionnelle de 4 212 colis de déchets (758 m^3), la deuxième, de même capacité sera mise en service en 2017. Leur durée d'exploitation prévisionnelle est d'au moins 50 ans.

Grâce aux améliorations de conception définies en coopération entre Areva et l'Andra pour cette extension (voir le chapitre 9), une durée d'exploitation de 75 ans au moins est envisagée, supérieure à celle des installations en service actuellement à La Hague (voir infra, § 3.2.2.3). Cela ouvre la possibilité d'une exploitation au-delà de 2080.

Outre les colis HA français, les entrepôts de La Hague gèrent des colis provenant du traitement de combustibles usés étrangers, avant d'être progressivement réexpédiés vers les clients étrangers d'Areva. Les colis de déchets HA vitrifiés correspondant au traitement des combustibles usés des clients étrangers d'Areva font l'objet d'expéditions depuis 1995. A fin 2010, environ 640 colis CSD-V étrangers, soit 115 m^3, étaient entreposés sur le site de La Hague.

[32] A la sortie de l'atelier de vitrification, les colis sont d'abord placés dans les entrepôts R7 ou T7, leur puissance thermique pouvant alors atteindre 4 000 watts. Ils sont transférés ensuite sur E-EV-SE lorsque leur puissance thermique passe sous 2 000 watts.

[33] Cette installation se situe à proximité du Centre de stockage de la Manche.

La Figure 3.1-2 représente à titre indicatif l'évolution dans le temps du nombre de colis de déchets vitrifiés produits correspondant à la part française et celle des capacités d'entreposage cumulées des ateliers R7, T7, de E-EV-SE et de sa première extension E-EV-LH. Les capacités indiquées ne préjugent pas de la part utilisée pour les déchets étrangers.

L'expédition progressive de colis de déchets étrangers et, à partir de 2036, celle des colis CSD-U de la famille F1-3-02 vers Cigéo (voir le chapitre 4) permettront de libérer des emplacements d'entreposage. En tout état de cause, une nouvelle extension de l'entreposage des déchets vitrifiés à La Hague sera nécessaire à terme (cf. chapitre 5).

Figure 3.1-1 E-EV-SE à La Hague [source Areva]

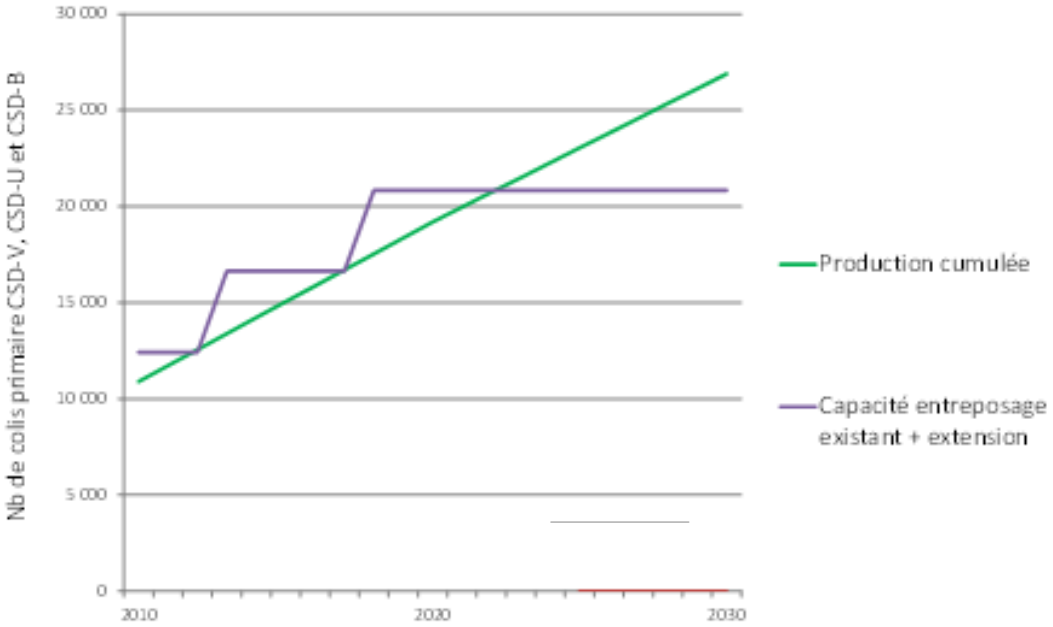


Figure 3.1-2 Production de colis de déchets vitrifiés (part française) et capacités des installations d'entreposage R7, T7, E-EV-SE et EEVLH (en cours de construction) sur le site de La Hague.

3.1.1.2 Site de Marcoule

L'Atelier de vitrification de Marcoule (AVM) dispose d'une capacité d'entreposage de 3 800 places, soit 665 m³, adjacente à la cellule de vitrification (SVM). Il a été mis en service en 1978.

L'AVM/SVM contient l'ensemble des colis de déchets HA vitrifiés qui y ont été produits (famille F1-4-01). Il entrepose aussi des colis MAVL conditionnés dans les mêmes types de conteneur que les déchets HA : effluents des rinçages vitrifiés des circuits de l'usine en cessation définitive d'exploitation (famille F2-4-13) et déchets technologiques d'exploitation de l'atelier (famille F2-4-05). A l'avenir le SVM accueillera probablement des colis de déchets qui seront vitrifiés dans les laboratoires d'Atalante.

En 1997, le traitement des combustibles usés a cessé sur UP1, mais la vitrification des solutions de produits de fission et d'actinides mineurs et des effluents de rinçage d'UP1 a continué jusqu'en 2012.

La Figure 3.1-3 compare la capacité d'entreposage du SVM au nombre de colis de déchets qui y seront maintenus au cours du temps (nombre de colis produits diminué du nombre de colis prévus d'être expédiés vers Cigéo, voir le chapitre 4).

Sous réserve que le SVM puisse être utilisé au moins jusqu'en 2035, celui-ci permettra de gérer les colis de déchets de l'AVM jusqu'à leur expédition vers Cigéo pour mise en stockage.

Les colis de déchets de la famille F1-5-01 sont entreposés dans le bâtiment 213 de l'atelier pilote de Marcoule (APM, Figure 3.1-4). Ils représentent 17 m³. La capacité d'entreposage du bâtiment n'est que partiellement utilisée. Cependant aucun colis supplémentaire ne sera produit et introduit dans cet entreposage mis en service en 1969.

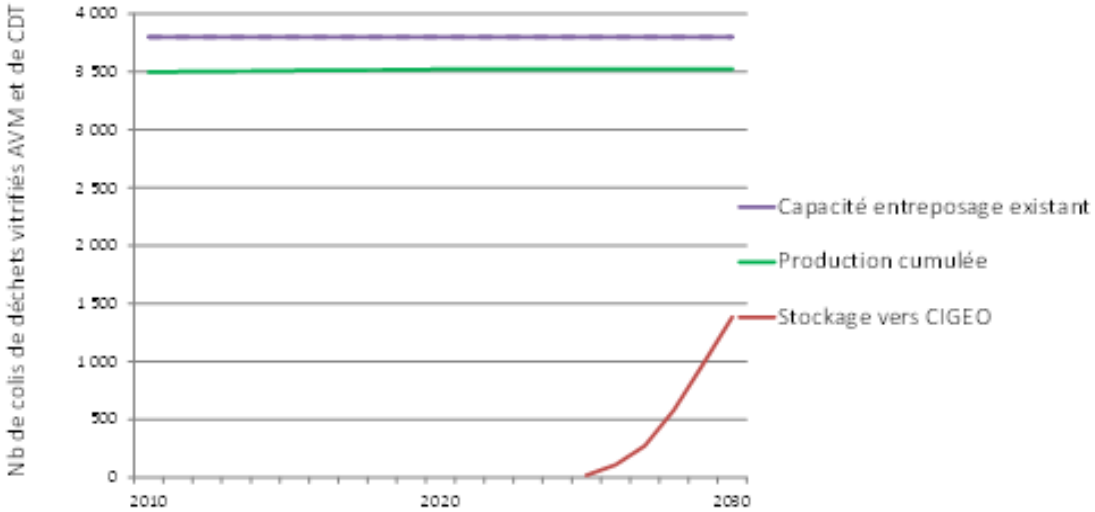


Figure 3.1-3 *Comparaison du nombre de colis de déchets et d'effluents vitrifiés de Marcoule et de déchets d'exploitation de l'Atelier de vitrification de Marcoule produits, expédiés vers Cigéo, et de la capacité d'entreposage.*

Figure 3.1-4 L'atelier pilote de Marcoule (APM, source CEA)

3.1.1.3 Site de Cadarache

La casemate d'entreposage à sec de Cadarache « CASCAD » (Figure 3.1-5) de l'Installation nucléaire de base (INB) n° 22 accueille (i) des combustibles usés de la propulsion nucléaire, (ii) des combustibles usés du CEA qui proviennent de ses réacteurs de recherche ou de développements expérimentaux sur des réacteurs de puissance, ainsi que (iii) des combustibles du réacteur EL4 de Brennilis. Seuls les combustibles provenant du réacteur EL4 constituent des déchets destinés à Cigéo (famille F1-5-02).

Les combustibles EL4 sont en cours de conditionnement. Ils représenteront à terme 2 667 étuis, dont 2 657 étuis de 9,3 litres et 10 étuis de 66 litres, soit 26 m^3. Provisoirement, une partie des combustibles EL4 en attente de conditionnement a été transférée sur l'INB 72 de Saclay[34 ; 35]. CASCAD a été mise en service en 1990.

Pour mémoire le site de Cadarache dispose aussi d'une capacité d'entreposage de combustibles usés sous eau : CARES[36], piscine d'entreposage du réacteur expérimental RES de la propulsion nucléaire, en service depuis 2005.

Figure 3.1-5 CASCAD à Cadarache (source CEA)

[34] L'INB 72 de Saclay est une station d'entreposage, de traitement et de caractérisation des déchets solides radioactifs, dont l'exploitation a été autorisée en 1971. Les opérations de désentreposage des combustibles et déchets présents dans les massifs, dans la piscine et dans les puits d'entreposage sont planifiées, des travaux préparatoires ont été effectués en 2008.

[35] Les combustibles usés du réacteur à neutrons rapides Rapsodie en cours de démantèlement sont en partie entreposés sous eau dans l'installation PEGASE à Cadarache (INB 22). Les combustibles usés des réacteurs de recherche en exploitation sur le centre de Saclay du CEA : Orphée et Osiris sont également dans un premier temps, dirigés sur l'INB 72 à Saclay et CARES. Enfin divers combustibles usés qui ont été expérimentés dans les réacteurs de la filière UNGG sont en attente sur PEGASE et sur l'atelier LECA/STAR (INB 55) à Cadarache. Progressivement, ces divers combustibles seront mis en étuis dans l'atelier STAR avant d'être placés dans CASCAD.

[36] Canal civil du RES, réacteur expérimental de la propulsion nucléaire.

3.1.2 Entreposage des colis de déchets MAVL

3.1.2.1 Site de Hague

ECC

Sur le site de La Hague, l'entreposage des coques compactées ECC (Figure 3.1-6) reçoit les colis de déchets de structure et technologiques compactés (CSD-C, famille F2-3-02). Cet entrepôt d'une capacité de 20 800 colis soit 3 744 m^3, a été mis en service en 2002 en même temps que l'atelier de compactage des coques (ACC). Des dispositions ont été prises dans la conception de l'installation pour en favoriser la durabilité (voir infra, § 3.2.3.1) si bien que la durée d'exploitation pourra vraisemblablement dépasser 50 ans.

Figure 3.1-6 ECC à La Hague (source Areva)

Comme E-EV-SE, ECC entrepose des déchets français et étrangers. L'expédition vers les installations des clients étrangers a commencé en 2009 et se prolongera au-delà de 2015.

La Figure 3.1-7 présente à titre illustratif l'évolution dans le temps du nombre de colis CSD-C français produits et la met en regard de la capacité de ECC, sans préjudice de la part de cette capacité occupée par les CSD-C étrangers. Areva a prévu de mettre en service une extension à l'horizon 2022, dont la capacité est à définir.

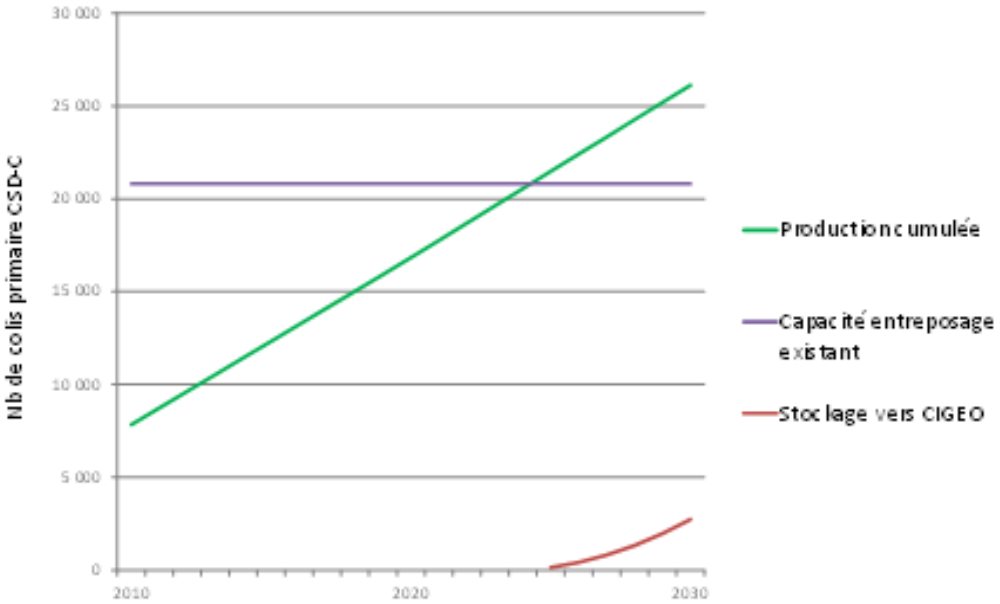


Figure 3.1-7 Comparaison du nombre de colis CSD-C produits et expédiés vers Cigéo et de la capacité d'entreposage d'ECC

EDS

Les entrepôts de déchets solides EDS accueillent les colis de déchets technologiques cimentés en conteneurs en amiante ciment (CAC, famille F2-3-07) et en conteneurs de béton de fibres (CBF-C'2, famille F2-3-08) ainsi que les colis de coques et embouts cimentés produits jusqu'en 1995 (famille F2-3-01). Ces entrepôts offrent une capacité[37] de 15 100 m³ pour les colis de déchets MAVL. De plus EDS gère des colis FMA-VC en attente d'expédition vers le Centre de stockage de l'Aube (voir infra, § 3.2.3.6).

Pour entreposer des colis de fines et résines cimentées (F2-3-13), Areva étudie la possibilité d'utiliser les capacités qui vont se libérer avec la reprise et le compactage des coques et embouts produits par les ateliers R1 et T1 entre 1995 et 2002, qui ont été entreposés temporairement en fûts ECE, sur cet atelier en attente de la mise en service de l'atelier ACC.

La Figure 3.1-8 présente une comparaison entre la capacité d'entreposage de EDS et les volumes de production des 4 familles de colis F2-3-01, F2-3-07, F2-3-08 et F2-3-13. Dans l'ensemble, le volume total de ces colis est presque stabilisé. En effet la production des colis de coques et embouts cimentés (famille F2-3-01) et de déchets technologiques solides en conteneur amiante – ciment (famille F2-3-07) est achevée. Le volume de colis de déchets technologique solides en conteneur béton CBF-C'2 : famille F2-3-08, n'augmentera que de 25 pourcents sur la période 2011–2030. Le conditionnement d'ici 2030 des déchets de la famille F2-3-13 représentera une part très minoritaire du volume total.

La capacité disponible apparaît suffisante pour accueillir une prévision de production qui fera passer le volume de colis MAVL de 9 358 m³ en 2010 à 10 903 m³ en 2030.

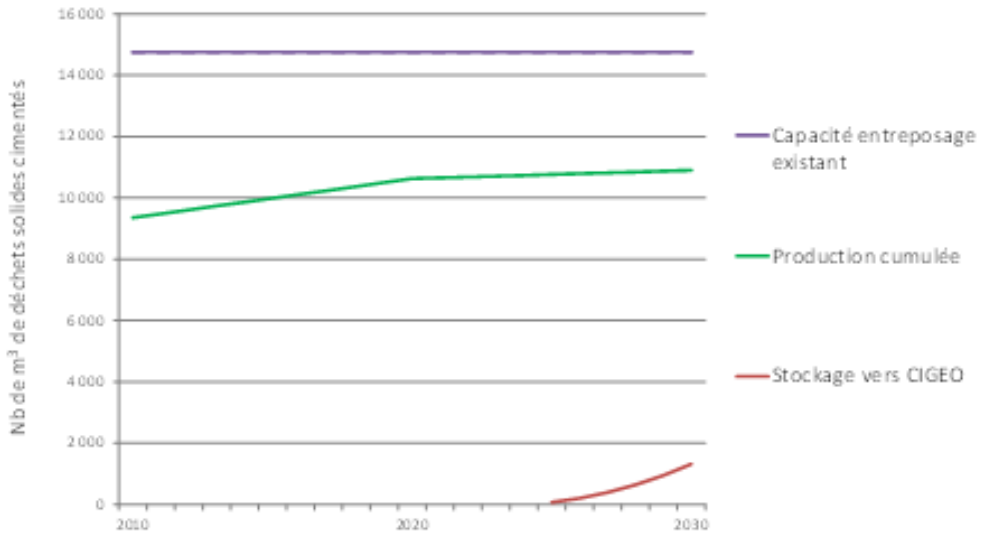


Figure 3.1-8 *Comparaison de la production de colis de coques et embouts, de déchets solides d'exploitation et de déchets pulvérulents cimentés, et de la capacité d'entreposage des déchets solides EDS à La Hague*

Bâtiments S et ES

Dans les bâtiments S et ES sont entreposés les colis MAVL de boues bitumées (familles F2-3-04 et F2-3-05). Areva prévoit d'y placer aussi les futurs colis de boues de STE2 conditionnées suivant un procédé alternatif au bitumage (famille F2-3-12, cf. chapitre 2) ainsi que les colis de déchets technologiques métalliques et organiques contaminés en émetteurs alpha (famille F2-3-10).

[37] Cette capacité se répartit entre EDS/EDT (7 684 m³), EDS/ADT2 (3 256 m³), EDS/EDC-A (1 678 m³), EDS/EDC-B et EDS/EDC-C (2 484 m³).

Le bâtiment S, d'une capacité de 20 000 colis soit 4 440 m³, a été mis en service en 1987. Il a été complété en 1995 par le bâtiment ES, comportant les unités de désentreposage et d'extension de l'entreposage des fûts de bitume (D/E-EB). Le bâtiment ES est situé dans le prolongement du bâtiment S et a une capacité de 27 000 colis soit 5 994 m³.

La Figure 3.1-9 présente une comparaison entre la capacité d'entreposage des bâtiments S et ES et l'évolution de la production des 4 familles de colis F2-3-04, F2-3-05, F2-3-10 et F2-3-12.

Les boues conditionnées dans la station STE3 par enrobage dans du bitume (famille F2-3-04) occupent actuellement un volume de 2 500 m³ environ du bâtiment S. Ce volume et celui de la famille F2-3-05 n'augmenteront que faiblement sur la période 2011–2030.

Les familles F2-3-12 et famille F2-3-10 s'ajouteront progressivement aux boues bitumées. Avec les hypothèses de conditionnement de l'Inventaire national, l'ensemble représentera en 2020 un volume total entreposé de 6 950 m³. En 2030, les familles F2-3-10 et F2-3-12 occuperont 60 pourcents environ de la capacité des bâtiments S et ES qui est de 10 434 m³. Cette capacité apparaît suffisante pour accueillir l'ensemble des productions jusqu'en 2030, soit au total 7 419 m³. Un désentreposage de la famille F2-3-04 pour sa mise en stockage à partir de 2025 ou 2030 (chapitre 4) pourra offrir des marges supplémentaires. Une attention particulière est à porter à la gestion des fûts de déchets alpha métalliques et organiques avant leur conditionnement.

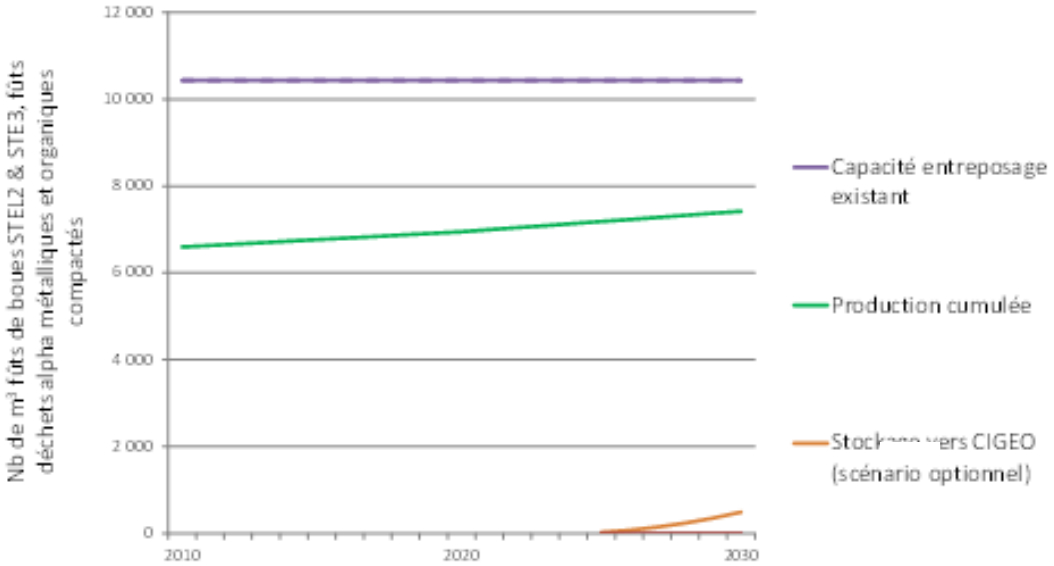


Figure 3.1-9 *Comparaison de la production de colis d'enrobés bitumineux, de boues STE2 et de déchets technologiques contaminés en émetteurs alpha sur le site de La Hague et de la capacité d'entreposage des bâtiments S et ES*

3.1.2.2 Site de Marcoule

<u>Casemates de la zone Sud</u>

Sur le site de Marcoule, comme cela a été indiqué au chapitre 2, les fûts anciens d'enrobés bitumineux produits avant 1995 qui étaient entreposés dans les fosses de la zone Nord en ont tous été retirés. Cependant la majorité des fûts anciens est encore entreposée dans les casemates n° 1 à 13 (zone Sud du site). Ces casemates ont été construites à partir de 1966. Leur obsolescence et le vieillissement de certains fûts conduisent à les en retirer progressivement pour les reconditionner. Cette opération est en cours sur les casemates n° 1 et 2. Elle est prévue à partir de 2017 pour les casemates 3 à 13. Une fois vidées, ces casemates seront mises à l'arrêt définitif et démantelées.

Les casemates n°13 et n° 14 (cette dernière a été mise en service en 1994) accueillent les colis de boues bitumées de la STEL produits depuis 1995 (Figure 3.1-10, famille F2-4-03). La production de ces fûts cessera à l'horizon 2015, date de mise en place d'un nouveau procédé de conditionnement des boues. La production cumulée de la famille F2-4-03 est donc pratiquement achevée.

EIP

L'entreposage intermédiaire polyvalent[38] (EIP) accueille des colis d'enrobés bitumineux en sur-fûts de 380 litres. Cette installation de conception modulaire est constituée aujourd'hui de deux alvéoles mis en exploitation en 2000, pour une durée prévisionnelle d'exploitation de 50 ans. Sa capacité est d'environ 11 500 colis de déchets de 380 litres.

Après avoir reçu environ 6 000 colis d'enrobés bitumineux sur-fûtés provenant de la zone nord, l'EIP reçoit actuellement des colis d'enrobés bitumineux sur-fûtés repris des casemates 1 et 2 de la zone sud. En 2010, 8 077 colis (soit un volume total de 3 069 m^3) étaient entreposés dans l'EIP, relevant essentiellement de la catégorie FAVL. A l'horizon 2017 la totalité de la capacité actuelle de l'EIP sera occupée par ces colis d'enrobés bitumineux sur-fûtés.

Figure 3.1-10 Casemate n° 14 de Marcoule (à gauche) et EIP (à droite) [source CEA]

3.1.2.3 Site de Cadarache

Parc d'entreposage des déchets radioactifs (INB n° 56)

Jusqu'en 2006, les colis MAVL du centre de Cadarache faiblement irradiants [FI] (définis par le CEA par un débit de dose au pseudo contact inférieur à 2 $mGy.h^{-1}$) et moyennement irradiants [MI] (débit de dose compris entre 2 $mGy.h^{-1}$ et 10 $Gy.h^{-1}$) étaient placés pour entreposage dans l'INB 56 (Parc d'entreposage des déchets radioactifs).

Cette installation a été mise en service en 1963 pour recevoir des déchets aussi bien que des colis. Elle comporte des bâtiments légers pour les colis FI et des fosses pour les colis MI. Elle ne reçoit plus de nouveaux colis depuis 2007. Toutes catégories confondues, le nombre de colis entreposés a atteint un maximum de 10 390 colis fin 2006.

En matière de déchets FI, sont entreposés dans l'INB 56 : 5 000 colis environ de déchets solides d'exploitation cimentés en fûts de 870 litres (famille F2-5-04) et de concentrats reconditionnés en fûts en acier non allié de 870 litres (familles F2-5-03), 4 500 colis environ de boues de filtration cimentées en conteneur béton de 500 litres (famille F2-5-02) auxquels s'ajoutent 268 conteneurs béton (1 800 ou 1 000 litres) reconditionnés en conteneurs métalliques de la famille F2-5-06.

[38] Le terme « polyvalent » renvoie à la possibilité d'entreposer des déchets de natures diverses. Cependant, le concept de l'EIP impose que tous ces déchets soient conditionnés dans le même modèle de conteneur (fût EIP).

Pour ce qui concerne les déchets MI, 1 000 colis environ de déchets solides d'exploitation en conteneur acier de 500 litres (famille F2-5-05) y sont entreposés.

A ces colis de déchets, il faut ajouter les colis de sulfates de plomb radifères[39] (famille F2-5-01) et les colis « blocs sources » cimentés (famille F2-9-01), ainsi que des déchets FI et MI partiellement conditionnés ou en vrac entreposés dans les fosses anciennes.

CEDRA

Après retrait progressif de l'INB 56, les colis de déchets sont transférés sur les installations de conditionnement et d'entreposage de déchets radioactifs « CEDRA » (INB 164).

CEDRA a été mis en service en mai 2006, pour une durée d'exploitation prévisionnelle de 50 ans. Pour les colis de déchets MAVL FI, cette installation est équipée actuellement de deux bâtiments d'entreposage ; le bâtiment n° 374 d'une capacité de 2 950 m³ et le bâtiment n° 375 d'une capacité de 1 500 m³, soit une capacité totale de 4 450 m³. Pour les colis de déchets MAVL MI, le bâtiment n° 376 a une capacité de 1 650 colis, soit 825 m³. Le décret d'autorisation de création de CEDRA prévoit des extensions. Il limite à 20 pourcents la fraction des déchets produits à l'extérieur du centre de Cadarache et entreposés dans CEDRA.

Les bâtiments 374 et 375 (Figure 3.1-11) reçoivent des colis de la famille F2-5-04 produits sur l'INB 37 ou retirés de l'INB 56 ainsi que des colis de la famille F2-5-02. Fin 2010, le volume occupé par les colis de déchets FI était de 1 217 m³.

La capacité d'entreposage FI actuelle de 4 450 m³ ne suffira pas à gérer l'ensemble des colis à produire ou qui pourront être retirés de l'INB 56. En effet, le volume cumulé des colis FI entreposés sur le site de Cadarache (INB 56 et CEDRA confondus) était de 7 859 m³ fin 2010. Il atteindra 8 272 m³ en 2030 (Figure 3.1-12). La réalisation de deux nouveaux bâtiments d'entreposage pour les colis de déchets FI pourra à terme porter la capacité totale à 8 800 m³.

Le bâtiment 376 accueille des colis MAVL MI de la famille F2-5-05, produits sur l'INB 37 ou retirés de l'INB 56. Fin 2011, les colis MI entreposés dans le bâtiment 376 représentaient un volume de 159 m³. La production de cette famille, qui a commencé en 1970, est régulière et se prolongera au-delà de 2030.

Comme dans le cas des déchets FI, la capacité MI actuelle de CEDRA (825 m³) ne suffira pas à répondre aux besoins : fin 2010, le volume total des colis MI entreposés à Cadarache était de 1 097 m³, il atteindra 1 632 m³ en 2030, soit 3 264 colis (Figure 3.1-13). Une extension est prévue avec une capacité de 825 m³.

Figure 3.1-11 Bâtiments n° 374 et 375 de CEDRA à Cadarache (source CEA)

[39] Ces colis de déchets peuvent dégager du radon impliquant des dispositions de ventilation particulières.

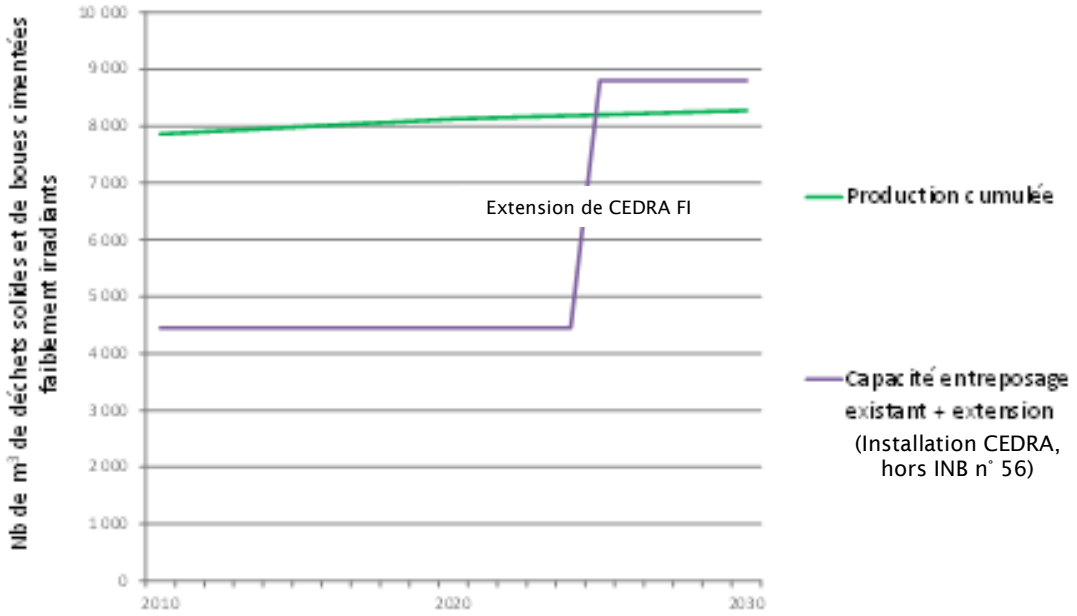


Figure 3.1-12 Comparaison de la quantité de déchets MAVL faiblement irradiants de Cadarache représentée en volume (m3) de colis équivalent conditionné et de la capacité de CEDRA FI

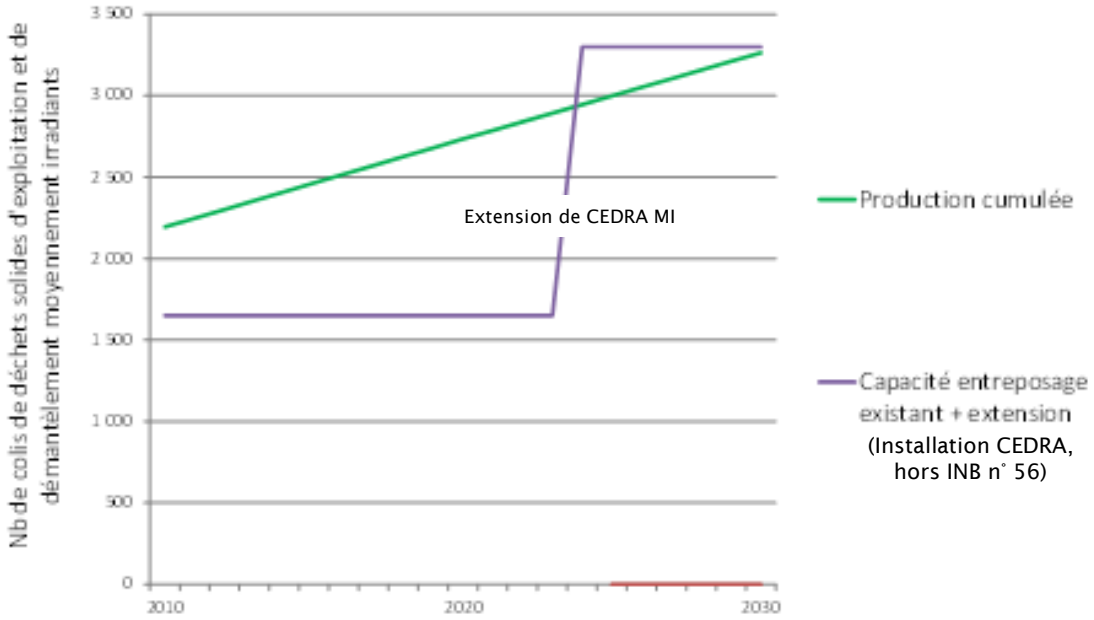


Figure 3.1-13 Comparaison de la quantité de déchets MAVL moyennement irradiants de Cadarache représentée en volume (m3) de colis équivalent conditionnés et de la capacité de CEDRA MI

3.1.2.4 Site de Valduc

Le Centre CEA/DAM de Valduc entrepose 360 colis de boues et concentrats cimentés MAVL de la famille F2-6-02, qui ont été produits par la station de traitement des effluents liquides et représentent un volume de 80 m³. Ils sont progressivement transportés vers l'entreposage CEDRA FI de Cadarache.

3.1.3 Bilan des capacités existantes

3.1.3.1 Capacités existantes pour les déchets HA

Le Tableau 3.1-1 ci-dessous récapitule les entrepôts de colis de déchets HA existants. Certains de ces entrepôts (R7 ou E-EV-SE et AVM) accueillent d'ores et déjà ou accueilleront des volumes marginaux de déchets MAVL. Cascad accueille aussi des matières en attente. Areva construit une extension à La Hague (E-EV-LH).

Tableau 3.1-1 Capacités d'entreposage existantes pour les déchets HA

Site	Entrepôts	Capacité actuelle (m³)	Familles	Description des familles de colis
La Hague	R7 T7 E-EV-SE E-EV-LH (en construction)	810 630 778 1 516	F1-3-01	Colis de déchets vitrifiés CSD-V
			F1-3-02	Solutions molybdiques vitrifiées (UMo)
			F1-3-03	Colis de déchets technologiques issus des ateliers de vitrification
			F1-3-04	Colis de capsules de titanate de strontium
			F1-3-05	Déchets issus des colonnes d'élution d'ELAN II B conditionnés en conteneurs standards
			F2-3-11	*Effluents de rinçage vitrifiés (MAVL)*
Marcoule	APM (Bât. 213)	Ne reçoit plus de nouveaux colis	F1-5-01	Colis de déchets vitrifiés PIVER
	AVM	665	F1-4-01	Colis de déchets vitrifiés AVM
			F2-4-05	*Colis de déchets solides d'exploitation de l'AVM, en conteneur inox (déchets technologiques MAVL)*
			F2-4-14	*Effluents de rinçage des cuves de solutions de produits de fission de Marcoule, vitrifiés en conteneurs inox (MAVL)*
Cadarache	CASCAD	>26 ([40])	F1-5-02	Etuis de combustibles usés EL4

3.1.3.2 Capacités existantes pour les déchets MAVL

Le Tableau 3.1-2 récapitule les entrepôts existants de colis de déchets MAVL et identifie les familles de colis présentes ou prévues dans ces entrepôts.

Certaines familles de colis MAVL à produire pourront être entreposées dans des installations existantes : ECC, EDS, bâtiments S et ES.

Des entrepôts anciens sont prévus d'être complètement déchargés d'ici deux à trois décennies, notamment les casemates n° 1 à 13 de Marcoule[41].

EDF construit une installation qui lui permettra d'entreposer les déchets activés d'exploitation et de démantèlement des réacteurs électrogènes (ICEDA, voir le chapitre 5). Ces déchets ne sont aujourd'hui pas encore produits ou bien ils sont entreposés sous forme non conditionnée (famille F2-2-03).

[40] La capacité totale de Cascad est partagée avec des matières.
[41] Il s'y ajoute d'autres entrepôts anciens de plus petites capacités, notamment l'INB 72 à Saclay.

Le CEA prévoit de commencer en 2013 la construction à Marcoule de l'installation d'entreposage DIADEM[42], pour une mise en service fin 2016, afin d'y accueillir la famille F2-4-14, une partie de la famille F2-4-12 ainsi que des déchets divers (voir le chapitre 5).

D'autres familles de colis en projet ne disposeront pas d'installation d'entreposage capable de les accueillir, nécessitant la création de capacités nouvelles (familles F1-4-07, F2-4-09, F2-4-10, F2-4-11, F2-4-15 et F2-4-14 pro parte). De même de nouvelles capacités seront nécessaires pour gérer les colis de déchets extraits des casemates 3 à 13 (F2-4-04 pro parte). Ces divers besoins renvoient au projet IAE[43] du CEA.

Tableau 3.1-2 Capacités d'entreposage existantes pour les déchets MAVL

Site	Entrepôts	Capacité actuelle (m3)	Familles	Description des familles de colis
La Hague	ECC	3 744	F2-3-02	Colis de déchets compactés CSD-C (déchets de structure et technologiques)
	EDS/ADT2 EDS/EDC-EDT	15 100	F2-3-01	Colis de coques et embouts cimentés en fûts métalliques de 1 500 l (déchets de structure)
			F2-3-07	Colis de déchets solides d'exploitation, cimentés en conteneurs amiante ciment CAC (déchets technologiques)
			F2-3-08	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés, en conteneurs béton-fibres CBFC'2 (déchets technologiques)
			F2-3-13	Déchets pulvérulents cimentés en fûts inox dits « ECE »
	Bâtiments S et ES	10 434	F2-3-04	Colis d'enrobés bitumineux produits à partir d'effluents traités dans STE3, en fûts inox de 220 l (boues bitumées)
			F2-3-05	Boues STE2 conditionnés dans une matrice bitumineuse, en fût inox 220 l (boues bitumées)
			F2-3-10	Déchets technologiques contaminés en émetteurs alpha
			F2-3-12	Boues de STE2 prévues d'être séchées et compactées l'étude
	R7 E-EV-SE	cf. Tableau 3.1 1	F2-3-11	Effluents de rinçage vitrifiés en conteneurs inox (CSD-B)
Marcoule	AVM	cf. Tableau 3.1 1	F2-4-05	Colis de déchets solides d'exploitation de l'AVM, en conteneur inox (déchets technologiques)
			F2-4-14	Effluents de rinçage des cuves de solutions de produits de fission de Marcoule, vitrifiés en conteneurs inox
	EIP	4 235 ([44])	F2-4-04	Fûts d'enrobés bitumineux (STEL) produits avant 1995, reconditionnés en fûts inox de 380 l (boues bitumées)
	Casemates 1 à 13	Ne reçoivent plus de nouveaux colis	F2-4-04	Fûts d'enrobés bitumineux (STEL) produits avant 1995, dont le mode de reconditionnement est à l'étude (boues bitumées)
			F2-4-03	Colis d'enrobés bitumineux (STEL) produits depuis 1995
	Casemate 14	1 200 environ		

[42] Entreposage de déchets irradiants ou alpha et de démantèlement
[43] Installation d'attente d'évacuation
[44] Capacité utilisée principalement pour la filière FAVL.

Site	Entrepôts	Capacité actuelle (m3)	Familles	Description des familles de colis
	A créer (DIADEM)	405	F2-4-12	Déchets du cœur du réacteur Phénix
			F2-4-14	Déchets de structure et de démantèlement de l'APM
	A créer : (IAE)	AD[45]	F2-4-07	Déchets de structure métalliques en fûts inox de 380 l
			F2-4-09	Déchets de structure magnésiens en fûts inox de 223 l
			F2-4-10	Déchets de procédé pulvérulents en fûts inox de 380 l
			F2-4-11	Déchets technologiques métalliques (et organiques) d'exploitation et de démantèlement, en fûts inox de 380 l
			F2-4-15	Aiguilles des barres de commande des réacteurs à neutrons rapides
Cada-rache	INB 56 et CEDRA FI (bât. n° 374 et 375)	4 450 (CEDRA[46])	F2-5-02	Colis de boues de filtration cimentées en coques béton de 500 l
			F2-5-04	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés, faiblement irradiants, en fûts métalliques de 870 litres
			F2-6-02	Boues et concentrats cimentés, en fûts métalliques du CEA Valduc
	INB 56 et CEDRA MI (bât. n° 376)	825 (CEDRA)	F2-5-05	Colis de déchets solides d'exploitation moyennement irradiants en fûts acier de 500 l (déchets technologiques)
	INB 56	Ne reçoit plus de nouveaux colis	F2-5-01	Colis de sulfates de plomb radifères, reconditionnés en fût inox
			F2-5-03	Fût de 700 litres de concentrats d'évaporation cimentés reconditionnés en conteneur métallique de 870 litres
			F2-5-06	Coques béton (1 800 ou 1 000 litres) de déchets solides cimentés (ciment ou ciment-bitume)
			F2-9-01	Colis « blocs sources »
Valduc	A créer	AD	F2-6-03	Effluents radioactifs provenant du recyclage de Pu vitrifiés, vitrifiés, en conteneurs inox
Bugey	ICEDA (en construc-tion)	4 000	F2-2-03	Déchets activés des réacteurs EDF hors déchets sodés, en conteneurs C1PG

[45] A définir, voir le chapitre 5
[46] L'INB 56 ne reçoit plus de nouveaux colis

3.2 L'expérience industrielle de l'entreposage de colis de déchets HA ou MAVL en France

Au travers de ses réalisations, l'industrie nucléaire française dispose d'une large expérience de la conception et de l'exploitation d'installations d'entreposage de colis de déchets. On décrit dans la suite les différentes techniques mises en œuvre en présentant les réalisations les plus marquantes, destinées à fonctionner encore au moins deux décennies.

Outre l'accueil et la conservation de colis de déchets, ces techniques permettent de réaliser les fonctions de sûreté suivantes :

- la protection des opérateurs et du public vis-à-vis de l'irradiation externe ;
- le confinement des substances radioactives contenues dans les déchets ;
- l'évacuation de la chaleur dégagée par les déchets (cela concerne principalement les déchets HA, ainsi que les déchets MAVL les plus actifs) ;
- l'évacuation des gaz de radiolyse (notamment l'hydrogène généré par certains déchets MAVL) ;
- la sûreté-criticité, lorsque les déchets entreposés contiennent une quantité significative de radionucléides fissiles.

3.2.1 Entreposage sous eau de combustibles usés

L'entreposage sous eau est largement pratiqué en France pour les combustibles usés destinés au traitement, aussi bien par EDF sur les sites des réacteurs électrogènes que par Areva sur le site de La Hague (cf. Figure 3.2-1). Il est aussi pratiqué par le CEA pour certains de ses combustibles usés (INB 72, Pégase).

L'entreposage sous eau est réalisé en piscines ouvertes dans lesquelles les assemblages de combustibles usés se trouvent directement au contact de l'eau.

Ils sont manipulés et placés à une profondeur de quelques mètres, la couche d'eau située au-dessus assurant la radioprotection.

L'eau constitue une deuxième barrière de confinement, la première barrière étant formée par le gainage des combustibles (ou le cas échéant l'étui étanche dans lequel un assemblage altéré est placé). Cette eau est traitée en circuit fermé au moyen de résines échangeuses d'ions afin de piéger des produits d'activation qui pourraient être relâchés par les assemblages, ou éventuellement les substances radioactives sortant de crayons ruptés. Le contrôle de la contamination de l'eau permet de surveiller l'état des assemblages entreposés.

L'eau assure également le refroidissement, la chaleur dégagée par les combustibles usés étant transférée par des circuits fermés vers des aéro-réfrigérants.

Enfin, elle participe à la sûreté-criticité de l'entreposage, en lien avec l'arrangement géométrique des assemblages dans des râteliers et l'ajout d'absorbeur neutronique (bore). Des dispositifs redondants assurent la permanence de la circulation, du contrôle et du traitement de l'eau.

Dans la pratique industrielle, les colis de déchets conditionnés ne sont pas entreposés sous eau. L'entreposage à sec est alors préféré pour ses performances technico-économiques et un moindre recours à des opérations actives pour le maintien des fonctions de sûreté.

Figure 3.2-1 Entreposage sous eau de combustibles usés (source Areva)

3.2.2 Entreposage à sec de colis de déchets HA

Les entreposages de colis de déchets HA vitrifiés exploités par Areva : R7, T7 et E-EV-SE à La Hague, et par le CEA : le bâtiment 213 et l'AVM à Marcoule présentent des similitudes :

- empilement des colis dans des puits verticaux ;
- évacuation par la ventilation de la chaleur dégagée par les colis.

Des différences entre installations portent notamment sur les modes de ventilation et de manutention. Certaines différences traduisent une évolution dans la conception des entrepôts depuis les plus anciens jusqu'aux plus récents.

3.2.2.1 L'entrepôt de l'Atelier de vitrification de Marcoule (SVM)

Dans l'entrepôt de l'AVM (SVM), les colis de déchets[47] sont empilés sur dix niveaux dans 380 puits verticaux. La chaleur dégagée par les colis est évacuée par une ventilation mécanique.

<u>Architecture et génie civil</u>

Le SVM, construit en 1978, comprend une structure de génie civil en béton, formant cinq fosses équipées de puits d'entreposage. Chaque puits est constitué d'une virole en acier inoxydable. Les différentes fosses d'entreposage n'ont pas été aménagées simultanément et ne présentent pas le même dimensionnement au séisme. Cela conduit l'exploitant à optimiser l'utilisation des différentes fosses, sur la base de l'analyse de sûreté de l'installation et des caractéristiques des différentes familles de colis entreposées.

Les fosses sont recouvertes d'une dalle. Un bouchon se trouve au droit de chaque puits d'entreposage (Figure 3.2-2). L'épaisseur de la dalle et des bouchons assure la protection biologique des opérateurs travaillant sur la dalle, vis-à-vis de l'exposition externe.

L'espace situé au-dessus de la dalle constitue un hall de manutention des colis. Il est protégé par une structure industrielle métallique.

Un couloir situé sous le niveau de la dalle assure la jonction entre l'entrepôt et la cellule de vitrification. Ce couloir permet l'amenée des colis préparés dans la cellule. Il constitue aujourd'hui la seule interface de l'entrepôt par laquelle des colis peuvent y être introduits ou en être retirés.

[47] Déchets vitrifiés de la famille F1-4-01, effluents de rinçage vitrifiés de la famille F2-4-13 et déchets solides d'exploitation non bloqués de la famille F2-4-05 (regroupés dans les fosses 4 et 5).

Figure 3.2-2 Hall de manutention de l'entrepôt de l'AVM avec ses équipements (source Areva)

Procédés et équipements

Plusieurs équipements mobiles réalisant la protection biologique des opérateurs sont utilisés pour introduire un colis dans un puits ou l'en retirer : un operculaire à tiroir blindé, un équipement de manutention de bouchon, une hotte de manutention de colis. Ces équipements sont déplacés dans le hall de manutention au moyen d'un portique. Les opérations sont conduites manuellement, et requièrent la présence d'opérateurs à proximité des équipements pour réaliser les connexions.

La séquence d'introduction, dans un puits d'entreposage, d'un colis en provenance de la cellule de vitrification (ou d'un autre puits d'entreposage dans le cadre de l'optimisation de l'utilisation des fosses) est la suivante :

- Amenée de l'operculaire à tiroir au droit du puits d'entreposage ;
- Enlèvement du bouchon du puits d'entreposage au moyen de l'équipement dédié : l'operculaire remplace alors le bouchon pour assurer la radioprotection des opérateurs ;
- Accostage de la hotte de manutention de colis sur l'operculaire, introduction du colis, enlèvement de la hotte de manutention de colis : l'accostage de la hotte sur l'operculaire assure la continuité de la protection des opérateurs ;
- Pose du bouchon du puits de manutention ;
- Enlèvement de l'operculaire.

L'évacuation de la chaleur dégagée par les colis s'effectue par un balayage d'air du bas vers le haut de chaque puits d'entreposage, dans l'espace annulaire centimétrique entre les conteneurs et la virole constituant le puits. L'air frais prélevé à l'extérieur est conduit à température ambiante à la base des puits, puis collecté en partie haute sous la dalle.

La puissance aéraulique est fournie par une unité de soufflage d'une capacité de 65 000 $m^3.h^{-1}$ qui alimente les 5 fosses. Le débit de ventilation de chacune des fosses est adapté au remplissage de la fosse et à au dégagement thermique des colis entreposés dans la fosse.

La température au cœur du verre doit rester inférieure de 100 °C à la température de transition vitreuse (ou seuil de recristallisation du verre) qui est de 610 °C.

Principes d'exploitation, sûreté

Avant d'être pris en charge par la hotte de manutention, chaque conteneur provenant de la cellule de vitrification est décontaminé et soumis à un contrôle de non-contamination externe par frottis.

En entreposage, le confinement des substances radioactives est assuré (i) par les colis (ii) par la filtration de l'air de refroidissement.

L'accès à un colis nécessite de retirer les colis situés au-dessus de lui dans le puits d'entreposage, et de les entreposer dans un puits en attente.

En fonctionnement normal, le soufflage d'air en amont des puits est doté de filtres à haute efficacité (HE) ; après balayage des puits d'entreposage, l'air extrait passe au-travers de filtres à très haute efficacité (THE) avant d'être rejeté à l'extérieur par la cheminée.

En cas d'arrêt accidentel de la ventilation mécanique (supposant une panne conjointe de l'extracteur principal et de l'extracteur de secours), un passage en ventilation naturelle est effectué manuellement pour préserver l'évacuation de la chaleur ; les filtres sont alors by-passés.

Les cinq fosses font l'objet d'une surveillance des températures et des débits d'air :

- mesures en continu des températures du béton des puits et de l'air en sortie des puits ;
- mesures en continu du débit d'air et de l'activité à la cheminée.

Des contrôles de variation de pression sont réalisés en continu au niveau des filtres afin d'identifier tout défaut (colmatage ou percement de filtre).

Les rejets gazeux font l'objet de prélèvements périodiques pour contrôles (filtres et barboteur).

3.2.2.2 Les entrepôts des ateliers de vitrification R7 et T7 (La Hague)

Les entrepôts associés aux ateliers de vitrification R7 et T7 ont été construits respectivement 10 ans et 15 ans après le SVM. Ils ont été conçus sur les mêmes principes d'empilement en puits et de refroidissement par ventilation mécanique ascendante, en utilisant le thermo siphonage comme force motrice complémentaire pour la circulation de l'air, mais pour des colis CSD-V dont la puissance thermique est supérieure. Par ailleurs les moyens de manutention ont fait l'objet d'évolutions notables.

<u>Architecture et génie civil</u>

Une dalle de radioprotection et des bouchons en béton lourd situés en tête de puits permettent de disposer d'un hall de manutention au-dessus des puits, en zone accessible contrôlée.

Chaque fosse d'entreposage comporte 100 puits dans lesquels peuvent être empilés 9 colis du type CSD-V. Les puits sont constitués de viroles métalliques suspendues à la dalle supérieure ce qui permet une libre dilatation et prémunit cette structure contre le risque de flambage sous l'effet des chargements mécaniques et thermiques.

L'entrepôt de R7 comporte cinq fosses et l'entrepôt de T7 de conception identique, en comporte quatre.

<u>Procédés et équipements</u>

Comme le montre la Figure 3.2-3, la manutention de la hotte de radioprotection contenant le colis, est réalisée par un pont transbordeur. Cette hotte une fois posée au droit d'un puits, permet de l'ouvrir en ôtant les bouchons de propreté et de radioprotection (qui sont placés dans un logement ménagé dans la hotte), puis d'introduire ou de retirer un colis du puits d'entreposage. De cette façon les colis sont manutentionnés en l'absence de tout opérateur dans le hall de manutention. L'entreposage est entièrement télé-opéré depuis une salle de conduite de l'usine UP2-800 pour R7 et de l'usine UP3 pour T7.

L'air extérieur est introduit dans un plénum inférieur, après être passé par un filtre de haute efficacité (HE). Il est mélangé à 10 pour-cent de l'air chaud du flux de sortie qui est soufflé en amont des puits, de façon à maintenir l'humidité relative de l'air en dessous du point de rosée.

Chaque fosse est équipée d'un ventilateur d'une puissance électrique nominale de 200 kW, qui est placé en extraction de façon à créer une dépression dans les puits.

En sortie, l'air passe par un filtre de très haute efficacité (THE).

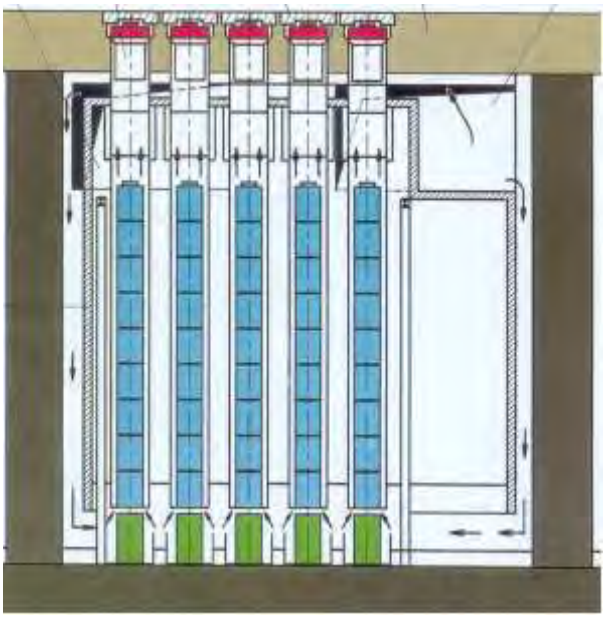


Figure 3.2-3 Entreposage R7 à La Hague : coupe schématique des puits d'entreposage (à gauche), hall de manutention au-dessus des puits (à droite) [source Areva]

Principes d'exploitation, sûreté

En fonctionnement normal, le confinement est assuré par les colis, formant la première barrière, et par la filtration de la ventilation de refroidissement, constituant la seconde barrière.

En cas d'arrêt accidentel de la ventilation mécanique, un registre permet à l'air, grâce à un basculement par guillotine, de contourner les filtres et de circuler en ventilation naturelle. Cela permet de maintenir l'évacuation de la chaleur.

En sortie du circuit de ventilation, le débit d'air est mesuré par deux types de capteurs, ainsi que l'activité et la température de l'air.

La radioactivité de l'air est contrôlée régulièrement sur le filtre THE de sortie et sur un échantillon d'air. Ce contrôle permet de surveiller l'étanchéité des colis.

Les prescriptions techniques imposent que l'air en sortie ne dépasse pas 180 °C, pour maintenir la température à cœur des blocs de verre inférieure à 510 °C. Au-delà la température approcherait à moins de 100 °C du point de transition vitreuse.

Dans la structure de l'entreposage sont disposés 4 500 capteurs de température. D'après les règles générales d'exploitation, la température du béton de la structure ne doit pas dépasser 90 °C et la température des structures aciers des puits doit rester sous 300 °C.

Le retour d'expérience indique que la température de l'air s'établit à un maximum de 90 °C dans les puits et à 80 °C en sortie.

L'accès à tout colis entreposé implique de retirer au maximum neuf colis.

Vis-à-vis d'une situation de chute de colis, chaque puits est équipé en partie basse d'un amortisseur constitué d'un tube mince qui s'écrase par flambage sous l'effet d'un choc direct éventuel avec le colis qui tombe ou par l'intermédiaire de l'empilement. Les amortisseurs sont dotés d'une tête dont la géométrie épouse la forme en creux du culot des colis CSD-V.

3.2.2.3 L'entrepôt complémentaire E-EV-SE (La Hague)

E-EV-SE reçoit les colis de déchets vitrifiés qui ont préalablement subi une période de décroissance thermique dans les entreposages R7 ou T7 de façon à faire passer cette puissance sous la valeur de 2 000 watts.

Leur entreposage dans E-EV-SE va durer plusieurs dizaines d'années pour réduire encore la puissance thermique. Les colis HA de puissance thermique moyenne (CSD-U, famille F1-3-02) et les colis MAVL (CSD-B, famille F2-3-11) pourront faire exception ainsi que les colis issus du traitement de combustibles étrangers qui seront retournés dans les pays concernés.

E-EV-SE a été mis en service sept ans après l'entreposage de R7 et trois ans après celui de T7, en reprenant les mêmes principes tout en les adaptant pour un fonctionnement sur la durée, avec une optimisation du confinement des radionucléides en situation incidentelle et de la passivité de fonctionnement.

<u>Architecture et génie civil</u>

La structure est modulaire. A l'entreposage actuel peuvent être ajoutées des extensions qui permettraient de multiplier la capacité par 5. La réserve foncière attenante permet d'envisager la construction de quatre fosses. Chaque fosse serait équipée d'un système de refroidissement autonome mais le système de manutention et le hall d'embarquement – débarquement des colis existants seraient partagés.

Actuellement E-EV-SE comporte deux fosses dans lesquelles sont placés 180 puits de plus grande hauteur que ceux de R7 et T7, l'empilement étant de douze colis. Pour cette raison les fosses sont semi-enterrées et un rabattement permanent de la nappe phréatique est réalisé autour de l'ouvrage par l'intermédiaire d'une fosse attenante à la fosse d'entreposage, qui est munie de deux systèmes de déclenchement des pompes de relevage de l'eau.

Comme sur R7 et T7 la dalle supérieure qui recouvre les fosses, assure avec les bouchons des puits la radioprotection. Elle comporte une structure porteuse mécano soudée qui est noyée dans une couche de béton armé coulée en place avec coffrage perdu (Figure 3.2-4).

Les puits sont constitués d'une double enveloppe métallique. Un tube interne fermé en acier inoxydable reçoit les colis. Il est équipé comme ceux de R7 de guides de centrage et d'un amortisseur en fond de puits. L'étanchéité est assurée au moyen d'un bouchon de radioprotection constitué principalement de béton. Le bouchon est recouvert d'une plaque de propreté en fonte. Ce tube interne est placé dans une virole métallique ouverte et l'espace annulaire est balayé par l'air de ventilation.

<u>Procédés et équipements</u>

La technologie de ventilation mise en place est une ventilation à tirage naturel. Cette technologie passive présente l'avantage de limiter l'implantation de dispositifs motorisés et donc d'éviter un incident de ventilation en cas de perte de l'alimentation électrique.

La ventilation se fait par admission d'air depuis une prise extérieure. Le débit d'air (94 000 $m^3.h^{-1}$ par alvéole) passe par des filtres électrostatiques qui en pratique sont très souvent inutilisés. Leur efficacité n'a pas été prouvée sur E-EV-SE, car une inspection vidéo par véhicule télécommandé du plénum d'admission de l'air et du plénum inférieur d'une fosse d'entreposage a mis en évidence l'absence d'empoussièrement.

L'air est amené ensuite dans le plénum inférieur où il est distribué entre les différents puits. L'air monte par thermo siphonage depuis les pieds de puits à travers l'espace annuaire délimité par les deux enveloppes qui forment chaque puits. Elles sont suspendues à la dalle supérieure de la fosse.

Le tube intérieur est fixé au radier de fond de fosse par l'intermédiaire d'un soufflet métallique qui assure son étanchéité (Figure 3.2-5).

De cette façon, un échange thermique est réalisé entre l'air de ventilation et les puits fermés dans lesquels sont empilés des colis. Les puits vides ne sont pas obturés mais le flux d'air qui les traverse est très modeste.

L'air est évacué par une cheminée, une par fosse, sans passer par un filtre en sortie qui introduirait une perte de charge incompatible avec cette ventilation naturelle. Aucun registre de régulation du débit n'y est d'ailleurs installé. Aucune mesure de débit ou de température n'y sont réalisées.

Un second circuit d'air descendant et forcé par extraction balaie le tube intérieur des puits et les colis. Le flux d'air est prélevé dans un local d'E-EV-SE où il est réchauffé, à la température ambiante du local. Il passe par des filtres de haute efficacité (HE), en entrée et par un filtre de très haute efficacité (THE), en sortie. L'air est évacué au moyen de grilles de ventilation en façade du bâtiment. Le débit est de l'ordre de 5 $m^3.h^{-1}$ par puits.

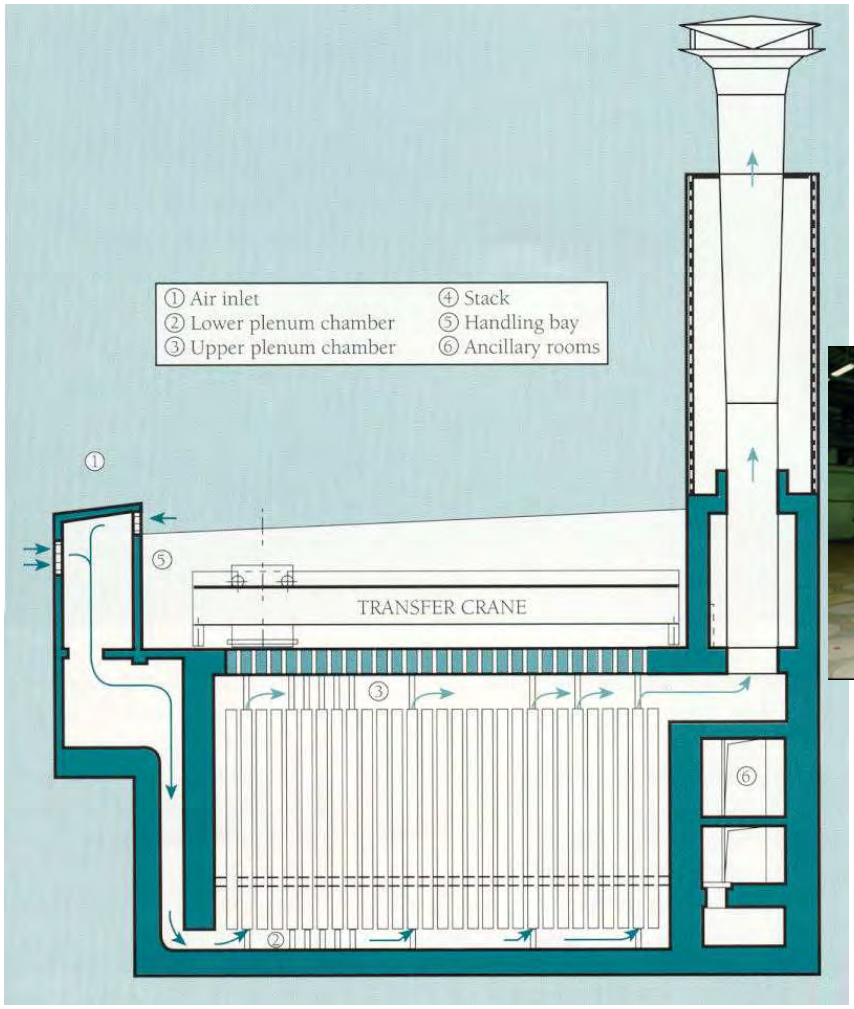


Figure 3.2-4 Entreposage E-EV-SE de colis CSD-V à La Hague : coupe schématique (à gauche), hall de manutention (à droite) [source Areva]

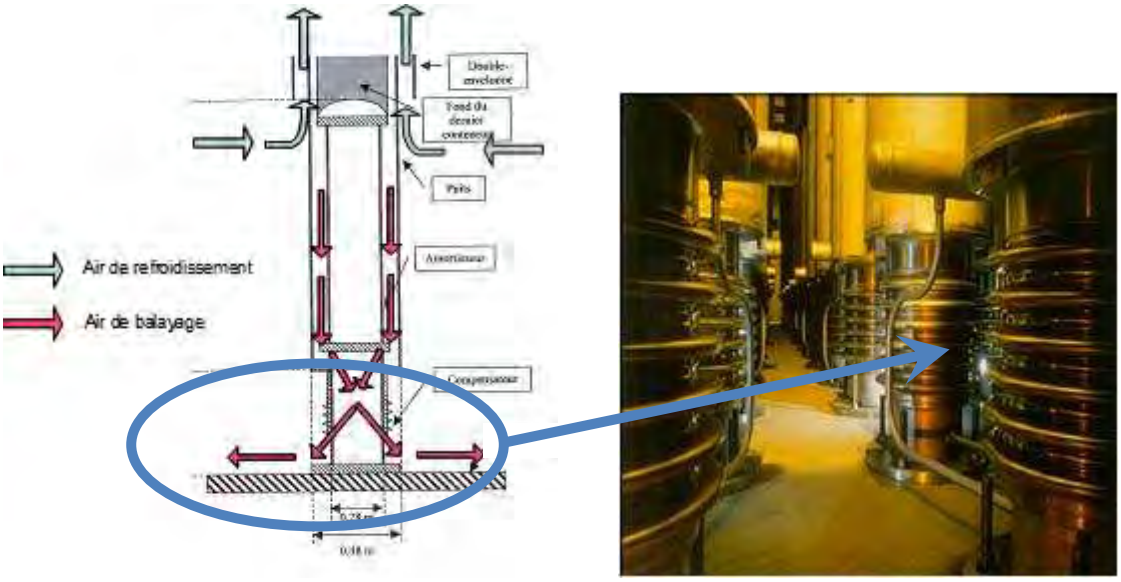


Figure 3.2-5 *Circulation de l'air de ventilation dans le double circuit des puits d'entreposage de l'installation E-EV-SE et soufflets compensateurs de dilatation en pied de puits d'entreposage (source Areva)*

Principes d'exploitation, sûreté

L'entreposage E-EV-SE en phase de chargement ou de déchargement de colis comme en phase de surveillance est entièrement télé-opéré depuis la salle de conduite de l'usine UP3.

La ventilation naturelle doit assurer sur E-EV-SE comme la ventilation mécanique sur R7 et T7, le respect du même critère thermique au cœur des colis de déchets vitrifiés les plus chauds (moins de 510 °C) et dans les bétons des alvéoles d'entreposage (température inférieure à 90 °C, en toutes situations). Il passe par le contrôle de la température en sortie haute des puits. D'après les modélisations une température de 140 °C peut être atteinte sans risque si l'entreposage est rempli de colis au maximum de leur puissance thermique. En pratique les mesures n'ont pas dépassé 90 °C, l'entreposage n'étant aujourd'hui que très partiellement rempli.

Le tube intérieur fermé des puits d'entreposage dans lequel les colis sont empilés constitue une barrière de confinement dynamique à la dispersion des déchets radioactifs en cas d'incident. Il protège également les conteneurs en acier inoxydable d'une éventuelle corrosion par l'air extérieur. Le balayage par le flux d'air assure l'évacuation d'éventuels gaz formé (par radiolyse de l'air ambiant) ou des aérosols et poussières qui seraient dispersés dans une situation hypothétique de chute d'un colis et de rupture de conteneur.

La radioactivité des filtres THE de ce circuit de balayage est contrôlée régulièrement afin de vérifier la capacité de confinement des colis qui constituent la première barrière.

L'accès à un colis entreposé nécessite de déplacer au maximum douze colis.

L'amortisseur de fond de puits est dimensionné pour garantir que la chute d'un colis de la hauteur maximale du puits n'entraînerait pas de perte de confinement. Il est amovible et doté d'une tête de préhension qui permet de l'agripper avec le même outil que les colis.

Aptitude à la durabilité

Une étude a été conduite par un groupe de travail CEA - Areva – SGN en 1999 et 2000 afin d'analyser les potentialités de E-EV-SE qui permettraient le cas échéant de prolonger son exploitation au-delà de la durée initialement envisagée.

Dans E-EV-SE chaque composant n'assure qu'un nombre très limité de fonctions de sûreté. Par conséquent la défaillance d'un composant quelconque ne pourrait pas entraîner la perte de plusieurs fonctions importantes pour la sûreté. Cela confère à l'installation une robustesse et donc une aptitude à surmonter des incidents dont la probabilité d'occurrence pourrait augmenter avec la durée d'exploitation.

Par exemple, le tube interne des puits assure le confinement des colis, leur guidage lors de la mise en place ou du retrait et la stabilité de l'empilement en cas de séisme, mais ne supporte pas leur poids qui est transmis au radier par l'intermédiaire de l'amortisseur de chute.

Le circuit de ventilation naturelle qui assure le refroidissement n'assure pas le confinement. Par conséquent la filtration de l'air en sortie n'est pas nécessaire et le recours à une ventilation mécanique non plus.

La radioprotection est assurée en partie haute par une dalle en béton armé qui ne joue pas de rôle mécanique. Celui-ci est reporté sur la structure mécano-soudée qu'elle enrobe et protège ainsi de la corrosion.

La limitation de la durée d'exploitation provient essentiellement de l'évolution thermique des matériaux et du vieillissement des composants sous l'effet des conditions climatiques. En particulier l'étude a mis en évidence un risque de corrosion atmosphérique de la partie basse des puits sous l'effet d'une possible condensation ainsi que le risque de corrosion des armatures, en particulier celles du radier après carbonatation du béton.

L'étude a abouti à des recommandations en matière de surveillance et à des préconisations techniques pour faire évoluer l'installation ou pour concevoir ses futures extensions.

Par ailleurs l'étude a souligné les qualités propres à E-EV-SE :

- La structure en béton armé est monobloc, avec des fondations sur radier général et voiles porteurs sans joint de dilatation.
- Le taux de travail des armatures a été réduit par rapport aux règles habituelles de l'Eurocode et leur enrobage a été accru (porté à 4 cm).
- Le bardage métallique extérieur assure une protection des bétons de structure et une isolation thermique externe.
- Les températures de dimensionnement dans les bétons ont été fixées à 45 °C, pour une température maximale acceptable de 90°C.
- La passivité de la ventilation et donc du refroidissement de la structure de l'entreposage est une garantie en cas d'incident.

Partant de cette étude, un groupe de travail Areva – Andra a élaboré des propositions d'amélioration pour la conception de la première extension de E-EV-SE. (voir le chapitre 9).

3.2.2.4 CASCAD

L'installation CASCAD assure l'entreposage de combustibles usés dans des puits étanches. Ces puits situés dans une structure en béton sont refroidis extérieurement par une circulation transversale d'air en convection naturelle.

La conception de CASCAD a été initiée en 1984 et mis en service en 1990 pour gérer les combustibles usés du réacteur EL4 alors entreposés dans une piscine sur le site de Brennilis. L'entreposage à sec avait été préféré à l'entreposage sous eau pour son coût de fonctionnement inférieur.

Le CEA avait comparé l'option en puits ventilés, le concept en conteneurs en béton mis en œuvre pour les combustibles usés Candu au Canada[48] et l'entreposage en emballages de transport métalliques, tel que pratiqué notamment en Allemagne (voir infra, § 3.3.3.1).

[48] Les combustibles usés EL4 présentent, comme les combustibles Candu, une puissance thermique modérée.

L'adaptation d'installations existantes avait été envisagée (dont la transformation de la piscine de Brennilis en entrepôt à sec). Le CEA a finalement retenu la construction d'un bâtiment neuf dans le cadre d'une extension de l'INB 22.

Architecture et génie civil

CASCAD comprend (Figure 3.2-6) :

- un hall de réception, de contrôle et d'expédition des emballages de transport de combustibles usés en étuis ;
- une cellule de déchargement et de manutention des combustibles usés en conteneurs ;
- une cellule d'entreposage équipée de 319 puits ;
- des locaux techniques (ventilation, sas camion, cellule de commande et de téléopération...).

La fosse d'entreposage est parallélépipédique et semi-enterrée. Les voiles en béton ont une épaisseur de 1,2 m. Les 319 puits verticaux en acier inoxydable (de diamètre 0,35 m et de hauteur 8,2 m) sont suspendus à la dalle supérieure de la cellule.

La cellule de déchargement et de manutention est située au-dessus de cette dalle. Elle est aussi constituée de voiles épais en béton, pour assurer la protection vis-à-vis de l'exposition externe, les conteneurs de combustibles usés n'étant pas manutentionnés à l'aide d'une hotte blindée.

Procédés et équipements, sûreté

La manutention des conteneurs de combustibles usés sans hotte, par télé-opération, constitue une originalité de CASCAD par rapport aux entrepôts de déchets HA vitrifiés décrits plus haut. Elle permet de réduire la charge manutentionnée au-dessus de la fosse d'entreposage.

Lorsqu'un emballage de transport a été introduit dans la cellule de déchargement et de manutention, puis ouvert, les opérateurs ne peuvent pas accéder dans cette cellule. La préhension d'un conteneur, son extraction de l'emballage, son déplacement jusqu'au droit d'un puits d'entreposage puis son introduction dans le puits sont réalisés par un pont roulant totalement télé-opéré (Figure 3.2-7).

Ce pont effectue aussi, au préalable, la dépose du bouchon situé au droit du puits d'entreposage, puis replace ce bouchon après l'introduction du conteneur. La cellule devient alors à nouveau accessible, la dalle équipée des bouchons de puits assurant, comme dans le cas des entrepôts de déchets HA vitrifiés, la protection radiologique vis-à-vis des combustibles entreposés. Le désentreposage de conteneurs de combustibles usés procède de façon inverse, avec les mêmes équipements.

Chaque puits d'entreposage est étanche, constituant une double enveloppe de confinement avec les conteneurs. La ventilation de refroidissement s'effectue à l'extrados du puits. La puissance aéraulique est assurée par convection naturelle. Un dispositif de ventilation forcée et filtrée peut être connecté sur le circuit de ventilation naturelle au cas où une contamination serait observée.

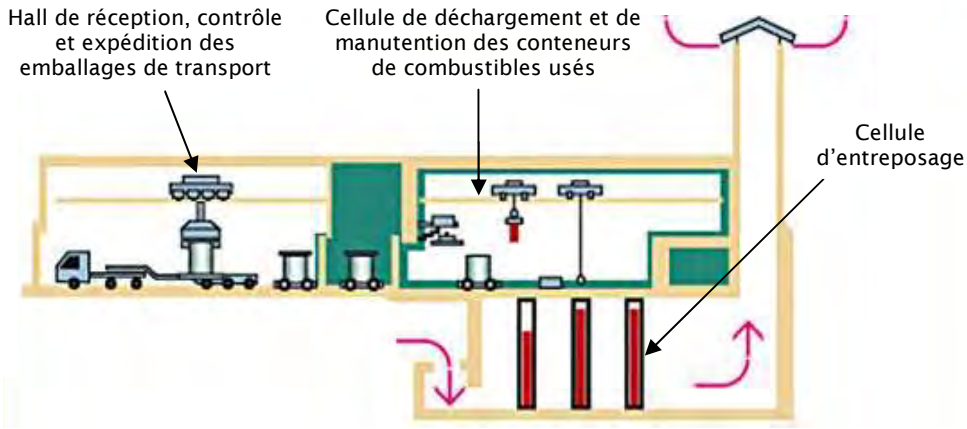


Figure 3.2-6 CASCAD : vue générale et coupe de principe (source CEA)

Figure 3.2-7 Cellule de déchargement et de manutention de CASCAD (source CEA)

3.2.3 Entreposage à sec de colis de déchets MAVL

Les options de conception d'entrepôts existants pour colis de déchets MAVL présentent une plus grande diversité technique que ceux accueillant des déchets HA. Cette diversité concerne notamment le positionnement des colis dans les installations (vertical ou horizontal, gerbé ou non) et le mode de manutention.

Elle peut être rapprochée de la diversité des colis MAVL, en matière de géométries et de masses de colis, de débits de dose, de contenus en matière fissile. Les modalités de ventilation varient selon les risques à prendre en compte, par exemple le dégagement d'hydrogène par certains colis MAVL.

3.2.3.1 ECC à La Hague

ECC, mis en service en 2002, accueille les colis CSD-C. Ces colis de déchets sont entreposés verticalement, sans gerbage, sur quatre niveaux de bâtiment. La manutention est réalisée par des chariots automoteurs. Les colis de déchets sont refroidis au moyen d'une ventilation forcée en air, au contact même des colis. Areva a apporté plusieurs innovations à l'entreposage ECC suite à l'étude mentionnée plus haut sur les potentialités de l'entrepôt E-EV-SE en matière de durabilité.

<u>Architecture et génie civil</u>

Le bâtiment est constitué de quatre zones essentielles (Figure 3.2-8) :

- Une zone de réception des colis CSD-C depuis l'ACC (repère A). Les colis sont repris et mis à disposition pour les transferts jusqu'aux alvéoles d'entreposage.
- Une zone de distribution des colis de manière à alimenter les différents niveaux d'entreposage (repère B). Un ascenseur assure les mises à disposition des chariots de manutention à ces différents niveaux.
- Une zone d'entreposage sur quatre niveaux, de 2 m de hauteur environ et séparés par des planchers en béton (repère C). Chacun de ces niveaux est composé d'une vingtaine d'alvéoles séparés par une allée centrale. Les colis de déchets sont déposés à la verticale sur les planchers de chaque niveau d'entreposage.
- Une zone de locaux techniques (repère D), abritant notamment les équipements de ventilation et de filtration nucléaire.

Le bâtiment est monobloc (sans joint de dilatation). Il est fondé sur radier.

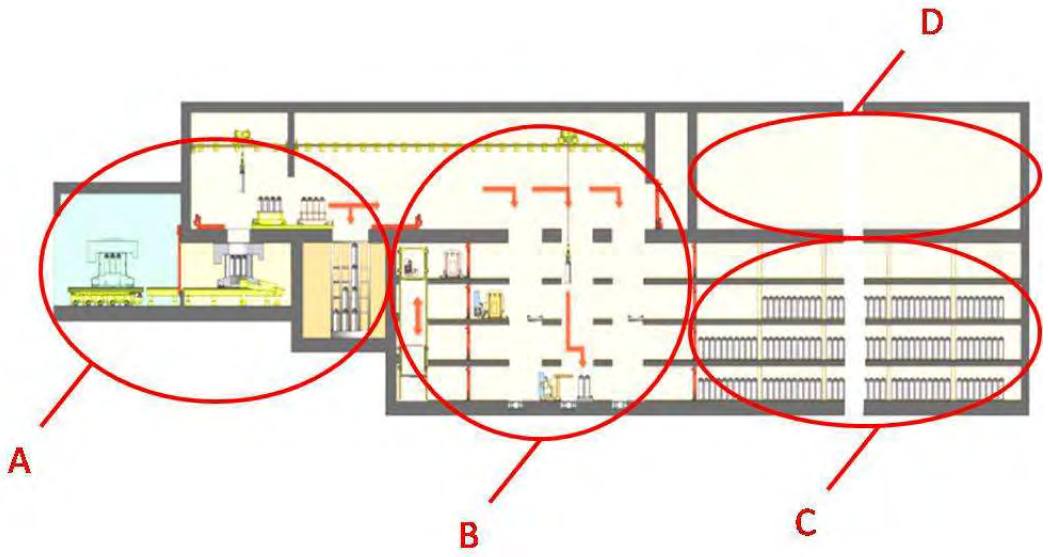


Figure 3.2-8 Coupe verticale de l'ECC (source Areva)

Procédés et équipements

La manutention des colis dans l'ECC est entièrement télé-opérée. Les colis CSD-C sont transférés depuis l'ACC par une navette transportant jusqu'à 7 colis à la fois. Les colis sont extraits un par un de la navette à l'aide d'un pont roulant. Les colis sont alors placés dans une structure à quatre étages pour être mis à disposition lors des opérations ultérieures. Les colis sont ensuite repris un par un avec le même pont roulant et acheminés jusqu'à l'étage d'entreposage désiré. La mise en place et la reprise des colis dans les alvéoles est assurée par deux chariots automoteurs se déplaçant sur rails (Figure 3.2-9). Ils transfèrent les colis 4 par 4, le premier chariot réalisant l'entreposage des colis dans les alvéoles, le second réalisant la mise en place des colis dans le couloir devant les alvéoles, optimisant ainsi le remplissage de chaque niveau d'entreposage.

La ventilation assure les principales fonctions suivantes :

- évacuation de la puissance thermique des colis de manière à limiter (i) l'échauffement du béton à moins de 90 °C (ii) la température d'ambiance à moins de 50 °C pour protéger l'électronique embarquée du chariot ;
- confinement dynamique des entreposages (classe C2FII) ; les locaux d'entreposage sont mis en dépression par rapport aux locaux adjacents et à l'extérieur ;
- conditionnement de l'atmosphère (hygrométrie relative inférieure à 70 %) permettant de maîtriser les phénomènes de corrosion ;
- évacuation des gaz de radiolyse ;
- maintien d'une température minimale de 14 °C.

La circulation de l'air est assurée par une convection forcée en circuit semi-ouvert. L'air de refroidissement est soufflé dans des carneaux en béton alimentant chaque étage d'entreposage des colis. Les colis sont donc refroidis par contact direct. L'air est extrait de chaque étage par des carneaux en béton jusqu'à l'émissaire de rejet (cf. Figure 3.2-10).

Les équipements de ventilation sont placés en partie supérieure de l'installation, en zone accessible de façon à permettre un remplacement aisé.

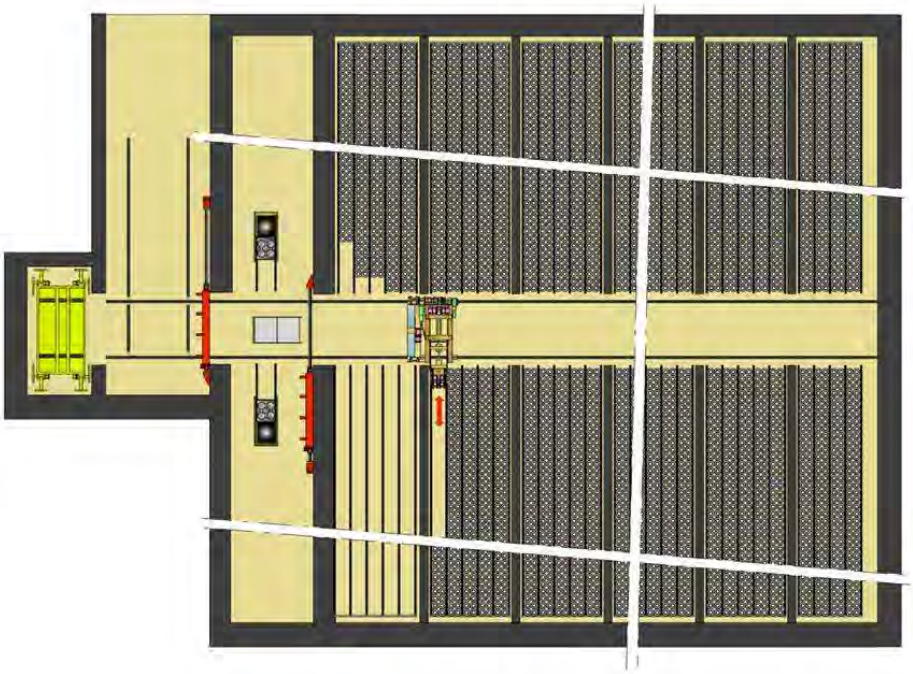


Figure 3.2-9 Plan masse de l'ECC, manutention des colis par chariots automoteurs (source Areva)

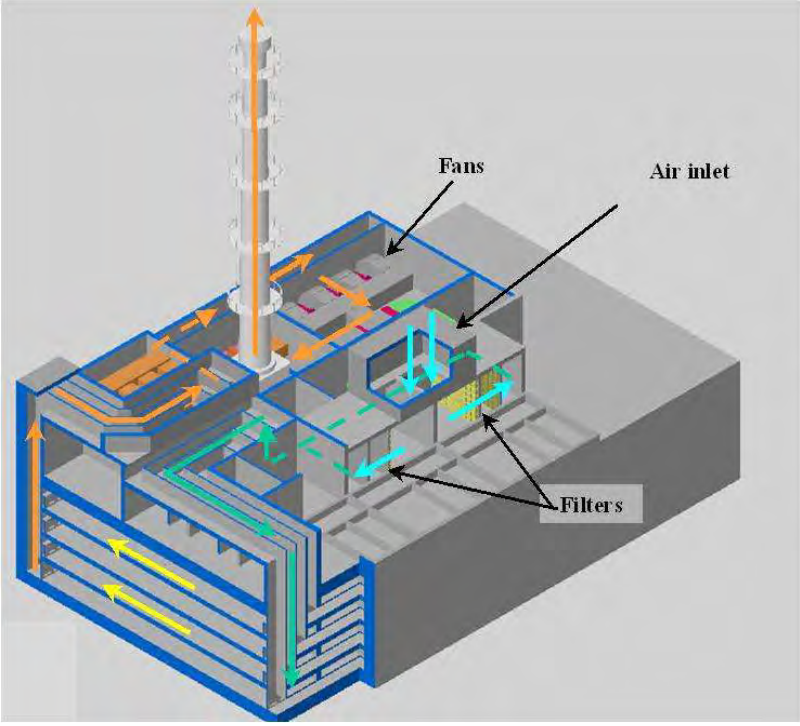


Figure 3.2-10 Principe de ventilation (source Areva)

Le schéma de ventilation est représenté par la Figure 3.2-11. Une batterie de filtration en amont et une autre en aval du refroidissement permettent à la fois de limiter l'introduction de poussières et de garantir le confinement des niveaux d'entreposage.

Un recyclage permet en effet de réchauffer l'air en entrée de manière à contrôler l'humidité relative en deçà du seuil fixé et d'assurer une température minimale de 5 °C en période hivernale. Le taux de recyclage peut atteindre 90 pourcents du débit total de refroidissement.

L'air recyclé est réchauffé par les colis lorsque les alvéoles sont suffisamment remplis. Dans le cas contraire, une batterie de chauffage apporte la chaleur nécessaire.

En fonction du taux de remplissage des alvéoles et en tenant compte de la décroissance thermique des colis, le débit de ventilation est ajusté tous les 2,5 ans par niveau. Ce débit varie de 7 000 $m^3.h^{-1}$ (un renouvellement à l'heure) à 35 000 $m^3.h^{-1}$ (cinq renouvellements à l'heure). La valeur la plus faible de débit correspond à un niveau vide de tout colis. La régulation est assurée sur l'ensemble du bâtiment par des variateurs de vitesse sur les ventilateurs et au niveau de chaque étage au moyen de registres motorisés.

En situation accidentelle (séisme), une partie du réseau peut être by-passée de manière à assurer un refroidissement par tirage naturel, en s'affranchissant des filtrations générant une perte de charge élevée.

Le dimensionnement de la ventilation pour le refroidissement est basé sur une puissance thermique initiale de 44 watts par colis. En pratique, le retour d'expérience sur la période 2002-2009 indique une puissance moyenne de 12 W avec un maximum inférieur à 39 W.

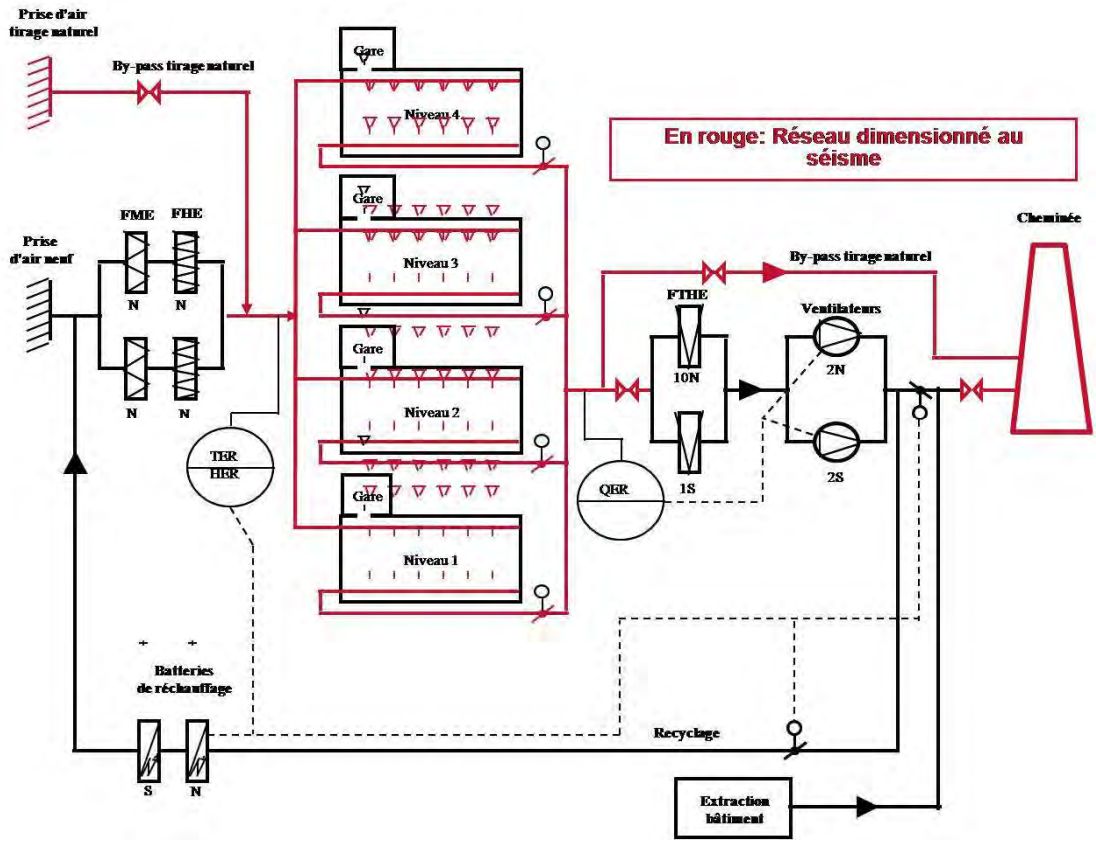


Figure 3.2-11 Schéma de ventilation (source Areva)

Principes d'exploitation, sûreté

Les halls d'entreposage dotés d'une ventilation nucléaire constituent une barrière de confinement dynamique capable de seconder une défaillance d'un ou de plusieurs colis de déchets (ces derniers constituant une première barrière de confinement).

Le dimensionnement des voiles et des planchers de la structure en béton armé garantit la sûreté-criticité de l'ensemble particulièrement compact des colis, les colis CSD-C figurant parmi les colis MAVL qui peuvent contenir les plus grandes quantités de radionucléides fissiles. Il assure également la radioprotection.

L'accès à un colis entreposé nécessite de déplacer un nombre relativement important de colis. Néanmoins le couloir central de l'entrepôt (Figure 3.2-9) facilite une telle opération.

Un programme de surveillance sur des colis inactifs (Figure 3.2-12), représentatifs des matériaux des colis actifs et des ouvrages en termes de remplissage et de gamme de fabrication a été mis en place. L'objectif est de vérifier le bon comportement dans le temps des colis et de l'entrepôt grâce à un examen périodique.

Aptitude à la durabilité

Comme pour E-EV-SE, le CEA et Areva ont mené une analyse de l'aptitude à la durabilité d'ECC, dans le cadre des recherches prévues par la loi du 30 décembre 1991.

Des précautions ont été prises dès la conception de la structure de manière à renforcer la durabilité du génie civil. Parmi ces dispositions, on peut notamment citer la formulation du béton dont le ciment, à faible chaleur d'hydratation, est à base de laitier et de cendres volantes, la majoration du ferraillage et de son enrobage (supérieur à 4 cm), la limitation des taux de travail des aciers, la mise en place du béton par plots alternés de façon à minimiser la fissuration de retrait, la protection des parements externes (bardages, enduits, isolation).

La ventilation maintient une atmosphère sèche favorable à la durabilité des armatures de la structure et des conteneurs en acier inoxydable. Le système de ventilation est simple, de maintenance aisée et une défaillance éventuelle laisse un temps de réaction important.

Le programme de surveillance mis en œuvre permet de décider, si besoin, des opérations de maintenance à entreprendre.

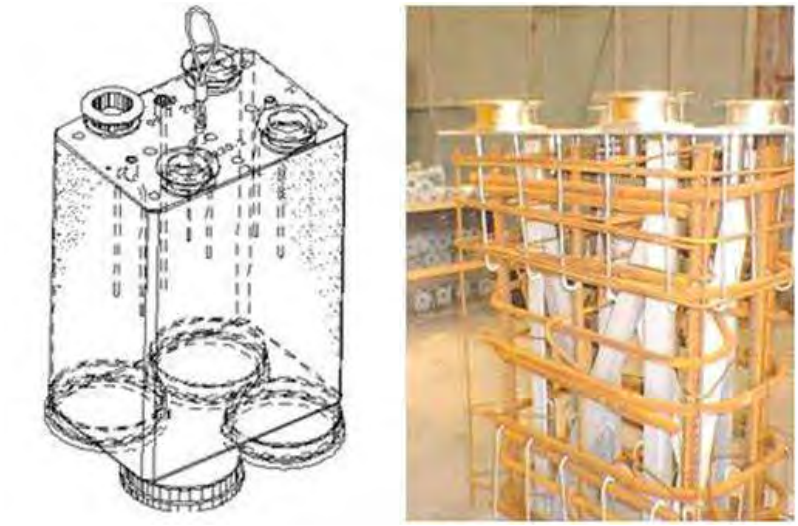


Figure 3.2-12 Colis témoins (source Areva)

3.2.3.2 CEDRA : bâtiment MI n° 376 (Cadarache)

Dans CEDRA, mis en service en 2006, l'entreposage des colis de déchets MAVL MI (famille F2-5-05) est réalisé en puits verticaux avec empilement.

Architecture et génie civil

Le bâtiment 376 (Figure 3.2-13) comporte un hall de service avec couverture et structure porteuse en acier. Il donne accès à des puits d'entreposage semi-enterrés en béton armé au-dessus desquels une dalle épaisse en béton armé assure la radioprotection avec au droit des puits, des bouchons lourds en béton. Le bâtiment comporte en sous-sol une cellule d'examen des colis et de décontamination avec des réservoirs pour recueillir des effluents liquides générés par les décontaminations éventuelles.

Le bâtiment 376 abrite 203 puits qui sont équipés d'un amortisseur dans lesquels peuvent être empilés 8 colis. La capacité maximale d'entreposage est de 1 500 colis car une ligne de puits reste libre pour permettre d'isoler des colis qui arriveraient contaminés.

Procédés et équipements

Le hall de service est équipé d'un portique qui permet de déplacer, à l'unité, les colis sous hotte de radioprotection (20 tonnes). Un opercule blindé (ouverture à tiroir) est mis en place sur le puits pour retirer son bouchon puis pour transférer le colis de la hotte dans le puits.

Chaque ligne de puits est ventilée par une circulation d'air extérieur du haut vers le bas. Il est soufflé et extrait à - 50 Pa en phase d'entreposage et à - 500 Pa en phase de chargement. Il peut être refroidi ou réchauffé afin d'être à une température proche de la température du hall (à quelques degrés Celsius près), de maintenir un degré hygrométrique inférieur à 80 pourcents et d'éviter les condensations en paroi de puits.

En complément chaque puits est doté en partie basse d'un collecteur qui recueille l'eau de condensation éventuelle pour surveillance.

Le débit d'air est de 7 000 $m^3.h^{-1}$ et peut être abaissé à 2 500 $m^3.h^{-1}$ lors de l'ouverture des alvéoles pour la manutention des colis (coupure du soufflage).

Le collecteur général de la ventilation nucléaire est doté d'un filtre THE (très haute efficacité).

La première ligne dans laquelle pourraient être placés des colis défectueux relâchant de l'activité donc contaminés est équipée d'un circuit de ventilation indépendant, avec filtre THE.

Les halls de service des bâtiments d'entreposage ne possèdent pas de ventilation nucléaire.

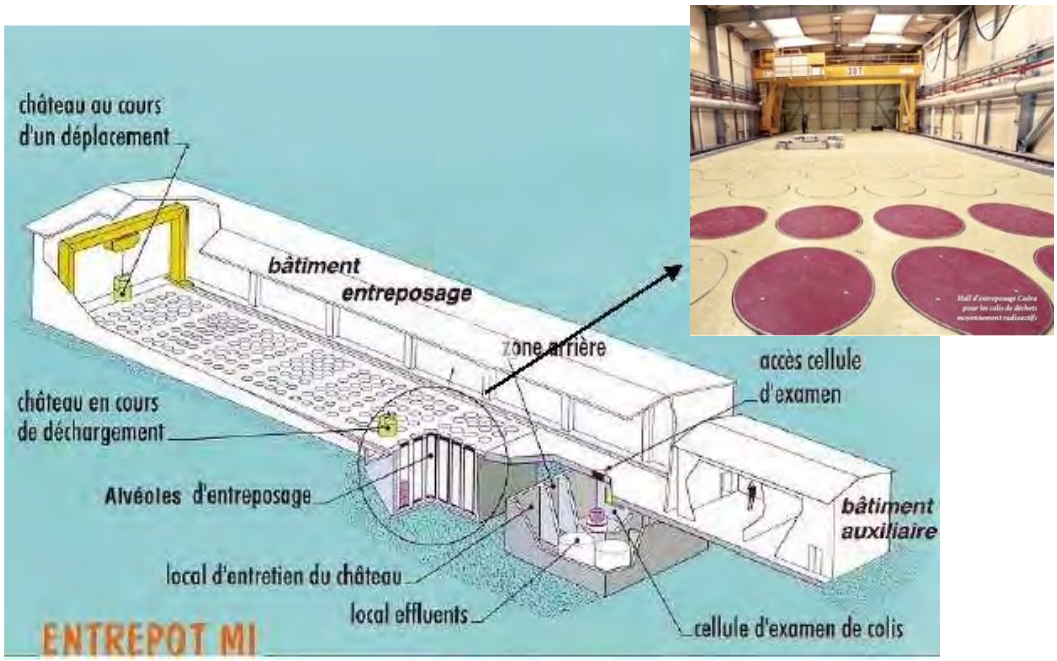


Figure 3.2-13 Vue générale du bâtiment 376, hall de manutention (source CEA)

Principes d'exploitation, sûreté

Les colis MAVL MI entreposés dans CEDRA se caractérisent par l'absence de dégagement thermique et de gaz radioactifs (autres que de faibles quantités de tritium). Les règles générales d'exploitation de CEDRA fixent à 1 mois la durée pendant laquelle la ventilation peut être accidentellement interrompue sans que la teneur en hydrogène dans l'air ne dépasse 2 pourcents. Corrélativement les spécifications d'acceptation limitent à 250 kg par colis, la masse de matières radiolysables. Les spécifications d'acceptation limitent également le contenu des colis en matières fissiles pour garantir leur caractère intrinsèquement sous-critiques.

Un contrôle périodique des colis est effectué pour garantir le maintien de leur intégrité sur la durée. Les conditions de mise en œuvre sont incluses dans les règles générales d'exploitation de CEDRA.

Les puits d'entreposage ventilés constituent une barrière de confinement statique et dynamique. Sur le collecteur général du circuit de ventilation nucléaire, la radioactivité α, β et γ de l'air est contrôlée par des mesures instantanées et hebdomadaires en amont et en aval des filtres THE qui divisent par environ 5 000 la teneur en aérosols[49] et qui sont installés à l'entrée de la cheminée.

Un barboteur en amont des filtres THE permet une mesure de l'activité tritium (sous les formes chimiques HTO et HT). Un piquage dans la cheminée permet des prélèvements d'air et des analyses des rejets en continu.

Si une anomalie est observée, il est possible d'obturer les lignes de puits et de les ventiler une à une afin de réaliser des mesures radiologiques dans l'air extrait.

L'accès à un colis s'effectue en retirant les colis (7 maximum) entreposés au-dessus dans le même puits.

Lors des opérations de manutention, les débits de doses au pseudo contact des colis sont contrôlés au moyen de 6 sondes de mesures, positionnées dans l'opercule de radioprotection placées sous la hotte.

Les colis situés en position supérieure des empilements sont soumis chaque année sur quelques puits à des contrôles de contamination surfacique. La cellule d'examen en sous-sol, mise en actif fin 2008, permet de contrôler l'aspect du colis et son niveau de contamination externe.

La production de condensats éventuellement recueillis dans les puits est contrôlée une fois par mois.

3.2.3.3 CEDRA : bâtiments FI n° 374 et 375

<u>Architecture et génie civil</u>

L'entreposage de colis FI de CEDRA mis en service également en 2006, est constitué d'un bâtiment à structure en acier équipé d'un pont roulant. Les colis sont empilés sur un radier horizontal construit au niveau du terrain naturel (Figure 3.2-14).

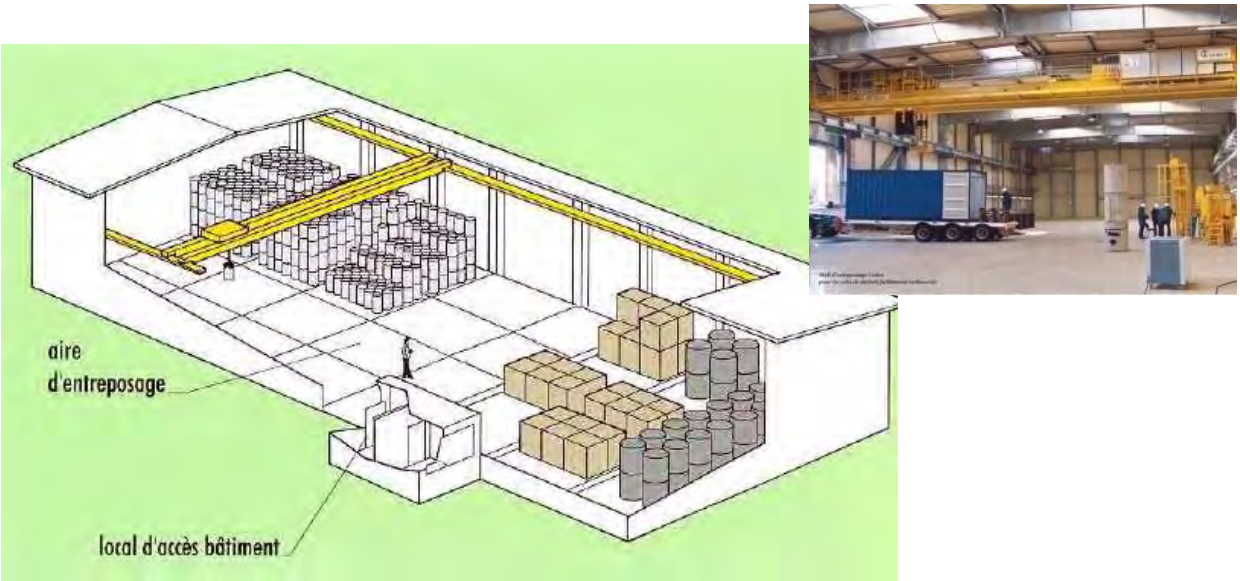


Figure 3.2-14 Vue générale d'un bâtiment d'entreposage de déchets FI de CEDRA (source CEA)

[49] Particules dont le diamètre est compris entre 10^{-2} et 10^{2} µm.

Procédés et équipements

Les bâtiments 374 et 375 ne possèdent pas de ventilation nucléaire. Ils sont ventilés naturellement.

Dans le bâtiment 375 des caissons humidificateurs mobiles maintiennent une hygrométrie proche de 60 pourcents (± 10 %) et un chauffage par air pulsé garantit en toute circonstance une température supérieure à 5 °C.

Principes d'exploitation, sûreté

Dans le bâtiment n° 375, les colis sont empilés à l'aide du pont roulant sur un maximum de 4 niveaux. Les colis les moins irradiants en fûts acier non allié de 870 litres (famille F2-5-4) sont placés en périphérie afin de servir d'écran aux colis en conteneur béton de 500 litres (famille F2-5-2) plus irradiants placés au centre.

Le bâtiment est doté d'une détection incendie. Différents contrôles de contamination par frottis sont réalisés avec une fréquence mensuelle et trimestrielle.

La température et l'hygrométrie de l'air sont contrôlées, un relevé hebdomadaire des prélèvements d'air est effectué, complété pendant les opérations de manutention des colis par un contrôle atmosphérique en temps réel.

Les colis font l'objet d'un examen visuel en utilisant un système vidéo monté sur une perche télescopique embarquée sur le pont de manutention.

Chaque année, un pourcentage donné de l'ensemble des colis entreposés est examiné : un pourcent des colis en conteneur béton de 500 litres (famille F2-5-02), vingt pourcents des colis en fûts en acier non allié de 870 litres (famille F2-5-04), auxquels s'ajoute un lot de colis témoins inactifs présentant des caractéristiques particulières.

3.2.3.4 L'EIP à Marcoule

Architecture et génie civil

L'EIP, mis en service en 2000, est de conception modulaire. Des alvéoles supplémentaires peuvent être adjoints aux deux actuellement construits et être desservis par les mêmes équipements de la chaîne de transfert des fûts de 380 litres. Chaque alvéole est une casemate de forme parallélépipédique en béton armé fondée au niveau du terrain naturel dont les parois épaisses assurent la radioprotection.

Les fûts de 380 litres sont disposés sur le radier en empilement pyramidal suivant une trame en quinconce. Sa base est constituée de 18 lignes de 62 fûts et sa hauteur maximale est de 7 fûts.

Figure 3.2-15 Vue intérieure de l'entreposage intermédiaire polyvalent EIP et fût en acier inoxydable de 380 litres (source CEA)

Procédés et équipements

Les fûts EIP sont amenés dans l'entreposage par camion. La remorque étant détachée et le tracteur retiré, le sas camion est fermé et la manutention est ensuite entièrement télé-opérée à partir d'une salle de conduite située dans l'installation. Les fûts EIP sont systématiquement soumis à un contrôle de la contamination surfacique et à une radiographie X. Ils sont placés par pont roulant sur un chariot de transfert qui dessert tous les alvéoles via le tunnel de transfert.

Les fûts sont ensuite prélevés sur le chariot et placés dans l'alvéole d'entreposage par le pont roulant qui équipe chaque alvéole. L'outillage de préhension des fûts est adapté aux fûts de 380 litres, l'accueil de colis comportant d'autres types de conteneur nécessiterait des transformations.

Dans les alvéoles, l'air est renouvelé par ventilation mécanique, de façon à maintenir la teneur en gaz de radiolyse et en particulier en hydrogène, très en dessous du seuil d'explosivité.

Principes d'exploitation, sûreté

L'air en entrée de ventilation est soumis à une filtration haute efficacité (HE) et en sortie à une filtration très haute efficacité (THE). De cette façon les alvéoles d'entreposage constituent une barrière dynamique de confinement qui complète la barrière statique que constituent les fûts EIP.

L'hygrométrie est suivie et régulée en fonction de la température de l'air entrant pour assurer l'absence de condensation. En hiver la température est maintenue par chauffage au-dessus de 17 °C. En été, l'air est déshumidifié et maintenu au niveau de la température de l'air extérieur.

Les paramètres de température, d'humidité relative et de (dé-)pression de l'air de ventilation sont enregistrés en continu[50].

Le programme de surveillance des colis en entreposage a été mis en place pour les premières années de fonctionnement. Il est basé sur :

- Des clichés radiographiques X de colis témoins à fréquence annuelle pour contrôler le gonflement éventuel des enrobés bitumineux sous l'effet de la radiolyse du bitume. Ces colis témoins ont été choisis à partir de la caractérisation du contenu radiologique du fût primaire effectuée lors du reconditionnement. Les colis témoins sont placés en partie haute des empilements pyramidaux.
- Des retraits de fûts EIP, qui sont ramenés sur l'enceinte de reprise des fûts de bitume (ERFB) pour une ouverture, un enlèvement du fût primaire d'enrobé et un examen de la surface interne du sur-fût de 380 litres.

Il est à noter que les colis situés à la base de l'empilement pyramidal sont difficiles d'accès sauf à déplacer un grand nombre de colis.

3.2.3.5 Bâtiments S et ES à La Hague

Les bâtiments S et ES constituent les entreposages associés à la station STE3 de conditionnement de déchets liquides dans des boues bitumées en fûts. Cet ensemble comprend un premier bâtiment S (1987) et un bâtiment d'extension (ES) mis en service en 1995. Ces deux bâtiments sont mitoyens, liés à STE3, et desservis par un accès commun en provenance de STE3. Le Bâtiment S comprend quatre fosses d'une capacité totale de 20 000 fûts soit 4 440 m^3. L'extension ES est également constituée de quatre fosses, mais leurs plus grandes dimensions leur confèrent une capacité totale accrue de 27 000 fûts, soit 5 994 m^3). Les principes d'architecture et les équipements de ces deux entrepôts sont similaires. La description ci-dessous porte sur l'entreposage ES, plus récent.

[50] La teneur en hydrogène n'est en revanche pas contrôlée en continu.

Architecture et génie civil

L'entreposage est constitué de fosses en béton armé d'une surface interne au sol de 13 m par 55 m, et d'une hauteur interne de 9,8 m. Le radier, les murs, et le plafond ont des épaisseurs de l'ordre de 1 m. Un espace additionnel est aménagé en tête de fosse pour assurer la reprise des fûts à entreposer (longueur 3,7 m). Un couloir de transfert de hauteur interne 2,7 m est aménagé en tête de fosse (dans l'axe perpendiculaire à ces fosses) pour amener les colis. Une trappe avec protection biologique située au-dessus de ce couloir permet la reprise des colis par le pont et leur transfert en position d'entreposage.

Les fûts sont entreposés à la verticale en pas triangulaire avec gerbage sur 8 niveaux. Ils forment un empilement de type pyramidal.

Les quatre fosses sont réparties de part et d'autre d'un hall central de transbordement. Ce hall de largeur 9 m permet le transbordement du pont de manutention d'une fosse vers l'autre.

Cependant, les ponts n'étant pas réversibles, le transbordement est dédoublé (un transbordement pour chaque côté du hall). Le plancher de ce hall est situé environ 2,5 m sous le plafond de la fosse. Sa hauteur d'environ 9,5 m permet de l'équiper d'un pont de maintenance.

Procédés et équipements

La charge admissible du pont qui dessert la fosse d'entreposage est de 10 kN ; ce pont fiabilisé est alimenté électriquement par frotteurs (avec redondance) et commandé à distance avec une liaison assurée par un système de transmission laser[51].

Les fûts sont amenés par le couloir de transfert sur un chariot pouvant transporter six fûts. Le chariot positionne successivement les six fûts sous la trappe blindée motorisée de la fosse. La trappe blindée est ouverte afin de permettre la reprise de chaque fût par le pont de 10 kN. Le fût est alors transféré par le pont jusqu'à sa position d'entreposage, en limitant les hauteurs de survol[52].

Le pont d'entreposage peut sortir de la fosse pour maintenance ou transbordement dans une autre fosse (située du même côté). Une continuité de rails est assurée entre les deux fosses d'entreposage en vis-à-vis et le hall d'entreposage. Des portes blindées de hauteur 3 m permettent d'assurer la radioprotection pour intervention dans le hall. Elles sont normalement en position fermée et ouvertes uniquement pour assurer le passage du pont d'entreposage.

Dans le hall de transbordement, un pont d'une capacité de 63 kN permet d'assurer les opérations de maintenance lourdes sur les ponts d'entreposage.

Principes d'exploitation, sûreté (hors ventilation nucléaire)

Les équipements assurant la transmission par laser sans fils sont accessibles dans le hall de transbordement pour maintenance au contact en fonctionnement normal (hors maintenance pont).

Les possibilités de défaillances des équipements de manutention ont été analysées. Des équipements de secours sont prévus afin de permettre d'affaler la charge et de récupérer et réparer l'équipement défaillant dans une cellule dédiée (hall de transbordement pour le pont d'entreposage). Le hall de transbordement est équipé pour pouvoir assurer une maintenance à distance (pont, hublots, télémanipulateurs).

[51] L'alimentation électrique et le contrôle-commande du bâtiment S sont plus classiques (liaison filaire).
[52] Le remplissage de la fosse s'effectue par couches successives avec des marches d'escalier liées au pas triangulaire.

Figure 3.2-16 Hall d'entreposage de STE3

3.2.3.6 Entrepôts de déchets solides EDS à La Hague

L'entrepôt de déchets solides EDS à LA Hague se compose de plusieurs installations.

EDS / ADT comporte deux alvéoles : ADT1 accueille les colis CBF-C2 de déchets MAVC avant leur expédition vers le CSA, ADT2 est aménagé pour recevoir des colis CBF-C'2 de déchets MAVL empilés sur 4 niveaux, en position horizontale (famille F2-3-08)

EDS / EDT - EDC comporte deux parties :

- EDS / EDC (entreposage des coques) comporte 3 alvéoles, dont 2 seulement : EDS / EDC-A et EDS / EDC – B accueillent les colis de coques et embouts cimentés dans des fûts en acier inoxydable (F2-3-01). Le troisième alvéole a été réaménagé pour l'entreposage de colis de déchets MAVL en conteneur CBF-C'2 (F2-3-08).
- EDS / EDT (entreposage de déchets technologiques) comporte 6 alvéoles dont 4 contiennent actuellement des colis de déchets MAVL en conteneur béton CBF-C'2 (F2-3-08) et en conteneur amiante ciment (F2-3-07), ainsi que des colis de déchets MAVC en conteneur béton (CBF-C2 et CBF-C2i).

EDS/ADT2 est constitué d'une casemate fermée en béton armé accueillant les colis CBF-C'2 gerbés à l'horizontale en quinconce. L'installation est définie et optimisée pour cette géométrie unique de colis.

Chaque colis repose horizontalement par deux de ses génératrices sur le colis du niveau inférieur. La casemate est constituée d'un radier muni d'une structure alvéolaire permettant d'assurer un espacement et un calage du premier niveau de colis. L'espacement ainsi obtenu pour le premier niveau permet de reproduire le même espacement à chaque niveau de colis gerbé.

Les voiles orthogonaux à l'axe des colis sont lisses. Ces voiles supportent le pont de manutention des colis. Un espace est ménagé entre le voile et le premier colis de la pile pour permettre l'approche du pont et le passage des pinces de manutention. Les voiles parallèles à l'axe des colis sont munis de renforts verticaux.

Les colis à entreposer sont réceptionnés à la verticale dans l'atelier de traitement des déchets solides (AD2). Ils sont ensuite repris pour être basculés en position horizontale (Figure 3.2-17), puis mis sur un plateau en attente d'une reprise pour transfert dans l'entrepôt (Figure 3.3-18).

Figure 3.2-17 EDS, dépose du colis à la verticale sur le basculeur (source Areva)

Figure 3.2-18 EDS, tampon pour reprise des colis à l'horizontale et transfert des colis en entreposage (source Areva)

3.3 L'expérience de l'entreposage à l'étranger

3.3.1 Principales installations d'entreposage dans les autres pays

Les besoins en entreposage des différents pays dépendent de l'importance de leur parc électro-nucléaire, ainsi que de l'option privilégiée pour la gestion des combustibles usés : traitement, stockage direct des combustibles, décision différée. Dans le premier cas, les installations d'entreposage de déchets HA vitrifiés et MAVL prennent une grande importance, alors que dans les autres cas, l'entreposage de combustibles usés, sous eau et à sec, joue un rôle essentiel.

Au **Japon**, une installation d'entreposage de déchets HA située à Rokkasho-Mura accueille les colis issus du traitement des combustibles effectué en France, au Royaume-Uni et localement. Elle est exploitée depuis 1995, et dispose d'une capacité de 2 880 colis. Le site de Rokkasho-Mura possède aussi des capacités d'entreposage des colis de déchets MAVL produits par l'usine de traitement.

De plus, les électriciens prévoient de construire une installation d'entreposage des colis de déchets MAVL produits en France et au Royaume-Uni et qui seront expédiés au Japon à partir de 2013, en attente de leur stockage géologique profond. En complément aux piscines situées sur les sites de réacteurs et de traitement, le Japon projette de se doter d'une installation d'entreposage à sec de combustibles usés, en attente de traitement à Mutsu d'une capacité finale de 5 000 tHM[53]. Le ministère japonais de l'industrie prévoit la construction de 3 à 6 centres de ce type d'ici 2050.

Au **Royaume-Uni,** l'entreposage de déchets HA et MAVL est réalisé industriellement sur le site de Sellafield. Afin de donner le temps nécessaire au processus progressif de mise en place d'un stockage géologique profond, le gouvernement britannique a décidé de réaliser un ou plusieurs entreposages pour 50 à 100 ans et de capacité suffisante.

En **Russie**, l'usine de traitement des combustibles usés RT1 (Mayak, région de Tchelyabinsk) est équipée d'un entreposage de colis de déchets HA vitrifiés. Elle ne reçoit que les combustibles usés des réacteurs à eau pressurisée VVER-440, d'un réacteur à neutrons rapides BN-600, et d'une partie des réacteurs de recherche et de la propulsion navale. Le reste des combustibles usés, en particulier ceux des réacteurs RBMK-1000 et VVER-1000, ne sont pas traités à l'heure actuelle.

La Russie a ainsi accumulé 18 500 tHM de combustibles usés[54], entreposés sous eau à la fois sur les sites de centrales nucléaires et de traitement (Federal Atomic Energy Agency of the Russian Federation, 2006). Un entreposage à sec (en puits ventilés) est en construction sur le site de Krasnoyarsk (d'une capacité de 37 785 tonnes). Il devrait entrer en service à pleine capacité en 2016. Sa durée d'exploitation prévue est de 50 ans.

En **Belgique**, les colis de déchets HA vitrifiés et les colis MAVL issus du traitement des combustibles (essentiellement des colis CSD-C et des colis de boues bitumées) sont entreposés sur le centre de Dessel, dans les bâtiments 127 (déchets MAVL), 129 (capacité de 250 m³ de déchets HA) et 136 (capacité de 600 colis HA et 1 000 m³ de déchets MAVL) gérés par la société BELGOPROCESS[55], et conçus pour une durée de vie[56] de 50 ans. Un entreposage à sec modulaire de combustibles usés est exploité depuis juin 1995 sur le site de Doel.

Aux **Pays-Bas**, les volumes de déchets à gérer sont peu importants. Mise en service en 2003, l'installation « Habog » (site de Borsele) entrepose la plus grande partie des déchets HA et MAVL néerlandais[57] ; elle est dimensionnée pour 750 m³ (250 colis de déchets HA vitrifiés, 50 étuis de combustibles usés, 600 colis de déchets MAVL). Elle est exploitée par l'opérateur de gestion des déchets radioactifs COVRA. L'autorisation d'exploitation porte sur une durée de cent ans.

En **Allemagne**, les combustibles usés sont entreposés sur les sites des réacteurs. Après une première phase de décroissance en piscine, l'entreposage s'y effectue à sec au moyen d'emballages métalliques de transport et d'entreposage (« Castor[58] »), dans des installations déjà opérationnelles ou projetées à court terme.

De plus l'Allemagne dispose de sites d'entreposage centralisé de combustibles usés et de déchets HA à Ahaus[59] et Gorleben[60], conçus selon le même principe.

---

53 La masse des combustibles nucléaires est quantifiée en tonne de métal lourd (ton of heavy metal) : tHM

54 Une partie de ces combustibles usés provient de l'exploitation de réacteurs de conception russe implantés dans d'autres pays.

55 Entreprise de droit privé fondée en 1984, filiale de l'Ondraf.

56 Plus récemment, la conception du bâtiment 155 pour l'entreposage de déchets FAVL a pris en compte une durée de vie de 80 ans.

57 En plus de combustibles usés entreposés en piscine sur les sites de Borsele et de Petten, des déchets ou échantillons de combustibles usés expérimentaux sont entreposés à sec à Petten.

58 Cask for Storage and Transport of radioactive Material.

59 L'entreposage d'Ahaus (Rhénanie-du-Nord-Westphalie) a été construit dans la seconde moitié des années 1980. La capacité autorisée est de 420 emplacements d'emballages correspondant à 3 960 tonnes de combustibles. L'exploitation nucléaire du centre a débuté en 1992. L'autorisation a été étendue au combustible du THTR 300 (Réacteur de recherche au thorium, à haute température arrêté en 1989). A fin 2004 l'entreposage avait reçu

En **Suisse**, chaque centrale électronucléaire entrepose sur site des déchets radioactifs de faible et moyenne activité et des combustibles usés. Un site d'entreposage centralisé de combustibles usés et de déchets HA vitrifiés, de conception comparable aux installations centralisées allemandes, est géré par les électriciens (ZWILAG). Sa capacité correspond à 50 années de production des cinq réacteurs nucléaires suisses. L'entreposage y a démarré en 2001. Un entreposage complémentaire, le Zwibez, est entré en exploitation fin 2008 à proximité de la centrale de Beznau pour les combustibles usés et déchets HA vitrifiés issus de cette centrale. Dans un hall attenant, un entreposage de déchets de faible et moyenne activité d'une capacité 6 000 m^3 est en exploitation depuis 1994.

En **Suède**, les combustibles usés sont entreposés de manière centralisée sous eau dans l'attente de leur stockage ; l'originalité de l'installation exploitée par SKB (CLAB, Oskarshamn, Figure 3.3-1 page 91) réside dans son implantation souterraine[61]. Le CLAB est exploité depuis 1985 ; par conception, sa durée de vie pourra atteindre 100 ans. Par ailleurs, SKB envisage à l'horizon 2020 un entreposage à faible profondeur de déchets activés MAVL issus du démantèlement de réacteurs, sur le site de Forsmark.

En **République tchèque** et en **Hongrie**, les combustibles usés et certains déchets HA font l'objet d'un entreposage centralisé réalisé à sec.

En **Espagne**, les piscines des réacteurs suffisent aujourd'hui à entreposer les combustibles usés[62], sauf dans le cas de la centrale de Trillo qui dispose d'un entrepôt à sec. De nouveaux besoins d'entreposage apparaîtront dans les prochaines années pour recevoir les déchets HA vitrifiés espagnols produits à l'étranger et pour relayer les piscines des réacteurs. La construction d'un entreposage centralisé, à sec : ATC est en projet à Villar de Cañas dans la province du Cuenca, dans l'attente de la mise en œuvre du stockage géologique. La phase de construction devrait être enclenchée rapidement. Une durée d'exploitation de 60 ans est visée.

Aux **Etats-Unis**[63], les électriciens ont complété leurs capacités d'entreposage sous eau en implantant 33 installations d'entreposage à sec de combustibles usés sur les sites de centrales nucléaires, dans l'attente d'une prise en charge par le Gouvernement fédéral. Des entrepôts de combustibles usés et de déchets HA vitrifiés ont aussi été construits sur des centres de recherche et sur les sites de la Défense. Ils représentent une quinzaine d'installations. La construction d'un entreposage centralisé à sec de combustibles usés sous maîtrise d'ouvrage d'une agence fédérale de gestion des déchets radioactifs à créer a été recommandée par la Blue Ribbon Commission[64].

L'**Ukraine** prépare un projet d'entreposage à sec sur site des combustibles usés de la centrale de Tchernobyl.

---

305 emballages Castor THTR/AVR (occupant l'emplacement de 50 emballages de combustibles industriels). A partir de 1998 il recevait des combustibles de réacteurs industriels à eau légère, 3 emballages Castor V/52 et 3 Castor V/19 (fonction du nombre de combustibles contenus). Le 30 mars 2006, 18 emballages Castor MTR2 supplémentaires avaient été entreposés pour des combustibles de recherche (par empilement de 3).

60 L'entrepôt de combustibles usés et déchets HA vitrifiés de Gorleben a une capacité est de 420 emballages Castor (correspondant à 3 800 tonnes de combustibles).

61 Le CLAB est construit en deux parties. Une première installation située en surface est destinée au déchargement des emballages de transport des assemblages de combustibles usés. L'entrepôt est constitué de deux excavations dans le granite situées une profondeur de 25 et 30 mètres, de longueur environ 120 mètres, contenant chacune cinq piscines. La capacité du CLAB a été portée à 8 000 tonnes.

62 Une compaction (re-raking) des râteliers des piscines a permis d'augmenter les capacités de ces dernières.

63 En 2040 près de 108 000 tonnes de combustibles usés et plus de 22 000 colis HA vitrifiés auront été produits aux Etats-Unis.

64 La Blue Ribbon Commission a été mise en place par le Président des Etats Unis pour formuler des recommandations sur la gestion des déchets radioactifs de ce pays suite à l'arrêt du projet de stockage à Yucca Mountain en 2009.

Au **Canada**, après une première phase de six à dix ans d'entreposage de décroissance dans la piscine des réacteurs, les combustibles usés Candu[65] sont entreposés à sec sur les sites des centrales, dans des conteneurs dédiés développés par OPG[66] (Dry Storage Containers - DSCs) ou par l'EACL[67] (conteneurs en béton et « MACSTORs »).

En **Argentine**, les combustibles usés sont aussi entreposés sur les sites des centrales nucléaires dans l'attente de leur stockage ; une installation d'entreposage à sec relayant la piscine du réacteur est opérationnelle sur le site de la centrale Candu d'Embalse, une autre est projetée sur le site d'Atucha (REP).

Dans la plupart des autres pays non cités ci-dessus (Finlande…), l'entreposage des combustibles usés en attente s'effectue sous eau sur le site des centrales nucléaires.

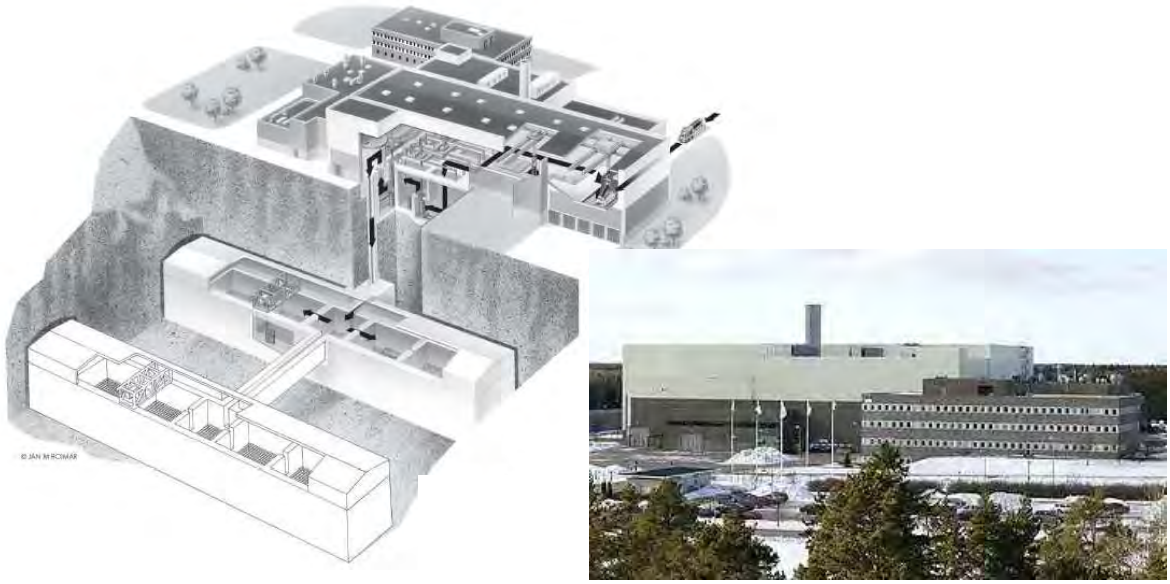


Figure 3.3-1 Le CLAB (Suède) : entreposage à faible profondeur de combustibles usés sous eau (source SKB)

3.3.2 Les installations étrangères d'entreposage à sec comparables à l'expérience industrielle française

Un grand nombre d'entrepôts étrangers de déchets HA vitrifiés ou de déchets MAVL mettent en œuvre des techniques proches de celles d'installations françaises décrites plus haut.

La conception de certains entrepôts à sec de combustibles usés peut aussi être rapprochée de celle de Cascad.

Le bâtiment 136 du Centre de Dessel (Belgique) et le Habog (Pays-Bas) se particularisent par l'accueil de colis déchets HA et MAVL de différents types dans la même installation, mais dans des alvéoles séparés. Ces deux installations seront décrites plus en détail dans la suite.

3.3.2.1 Casemates ventilées d'entreposage de déchets HA vitrifiés

L'installation d'entreposage de colis de déchets HA vitrifiés de l'usine de traitement de Rokkasho-Mura (Japon, Figure 3.3-2) adopte des principes de conception comparables à E-EV-SE. Chaque puits, accueillant 9 conteneurs empilés, est confiné par une gaine. Le refroidissement est assuré par un circuit d'air ventilé autour des gaines.

---

65 CANada Deutérium Uranium : filière de réacteurs à l'uranium naturel refroidis et modérés à l'eau lourde, développée depuis les années 1950 au Canada.
66 Ontario Power Generation.
67 Energie Atomique du Canada Limitée.

L'installation d'entreposage de Sellafield (Royaume-Uni, Figure 3.3-3) et le bâtiment 129 du Centre de Dessel (Belgique, Figure 3.3-4) recourent au principe de puits ventilés, à l'image de l'AVM et des entrepôts des ateliers R7 et T7.

Aux Etats-Unis, deux bâtiments d'entreposage (GWSBs[68] 1 et 2) accueillent[69] les colis de déchets vitrifiés sur le site de Savannah River. L'installation se distingue par l'absence d'empilement des colis sous la dalle de radioprotection, la ventilation de refroidissement assurant un balayage horizontal des colis (Figure 3.3-5). Cette configuration maximise l'accessibilité de chaque colis entreposé, mais augmente l'extension horizontale de l'entrepôt. Dans l'un des bâtiments, la ventilation est assistée mécaniquement, alors que dans l'autre elle est uniquement passive. La manutention s'effectue de manière originale par un engin sur pneus (au lieu d'un pont roulant ou d'un portique utilisés dans les autres installations).

En Inde, les déchets HA vitrifiés sont entreposés depuis 30 ans dans une installation au principe d'architecture comparable, hormis la manutention par un pont roulant (Figure 3.3-6). Une nouvelle installation (VWSF), de conception plus proche de R7/T7, est en construction à Kalpakkam ; elle comprend des puits ventilés dans lesquels les colis seront empilés.

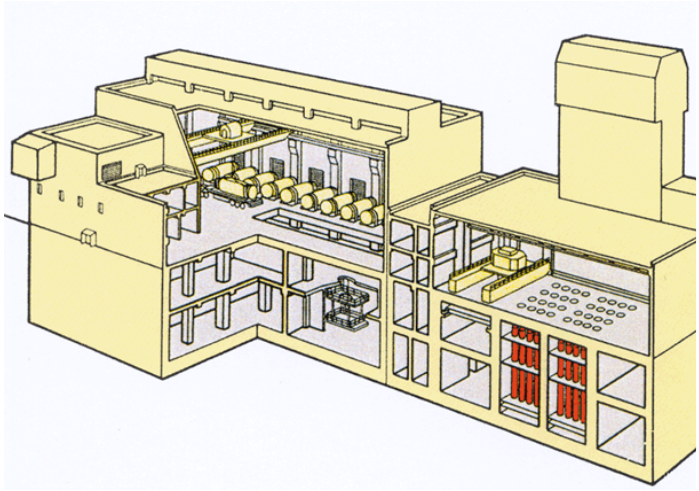


Figure 3.3-2 Installation d'entreposage de colis de déchets HA vitrifiés de Rokkasho-Mura (Japon) [source Areva]

[68] Glass Waste Storage Building. Le bâtiment 1 dispose de 2 253 emplacements d'entreposage, le bâtiment 2 de 2 340 emplacements.

[69] Les bâtiments ont été conçus pour une durée d'exploitation de 50 ans, mais la durée de vie est estimée à 100 ans.

Figure 3.3-3 *Hall de manutention de l'installation d'entreposage de déchets HA vitrifiés de Sellafield (source Sellafield ltd)*

Figure 3.3-4 *Le bâtiment 129 du Centre de Dessel pour l'entreposage de déchets HA (source Ondraf)*

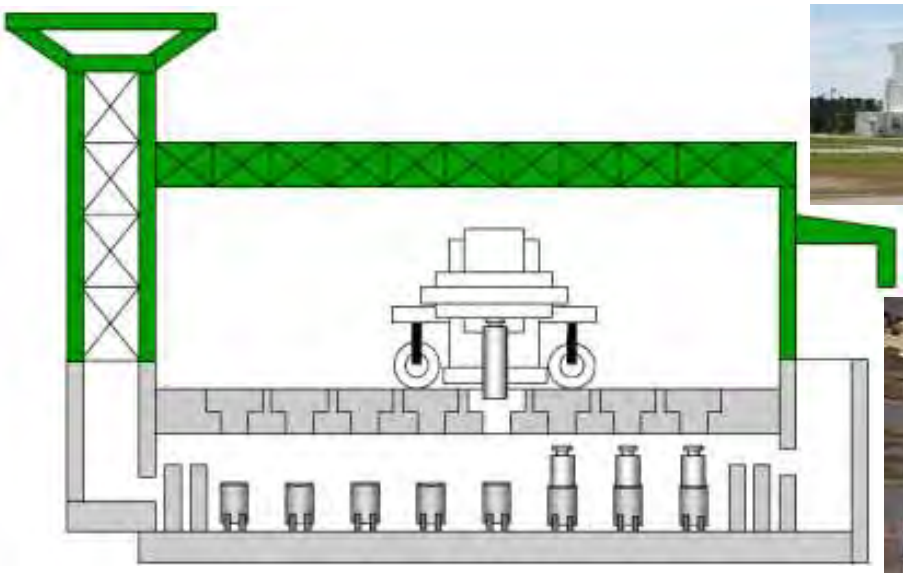


Figure 3.3-5 *Installation d'entreposage de colis de déchets HA vitrifiés de Savannah River, au centre, bâtiment GWSB n° 2, à droite, engin de manutention des colis sur pneus (source US-DOE)*

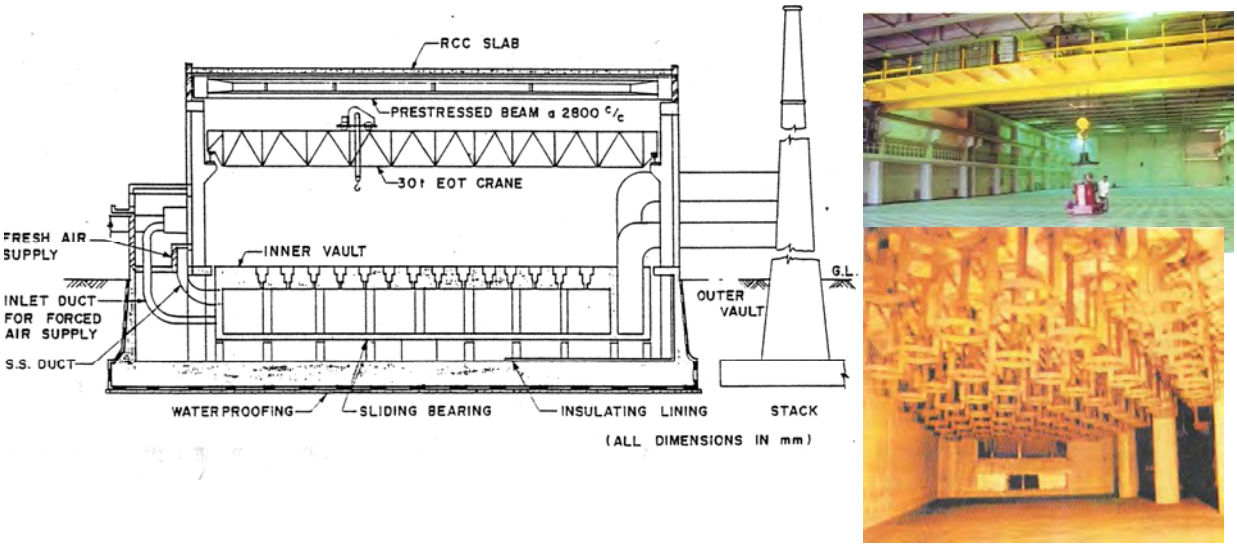


Figure 3.3-6 Installation d'entreposage de colis de déchets HA vitrifiés (SSSF) de Tarapur (Inde) [source Bhabha Atomic Research Centre]

3.3.2.2 Casemates d'entreposage de déchets MAVL

Dans de nombreuses casemates d'entreposage de déchets MAVL, les colis sont gerbés sur un radier. A titre d'exemple, le principe de conception du bâtiment d'entreposage de déchets de moyenne activité du Centre de Dessel (Belgique) peut être rapproché de celui des bâtiments S et ES à La Hague (Figure 3.3-7).

Figure 3.3-7 Le bâtiment 127 du Centre de Dessel, pour l'entreposage de déchets de moyenne activité (source Ondraf)

3.3.2.3 Casemates d'entreposage à sec de combustibles usés

Le concept « Modular Vault Dry Store » (MVDS) est un exemple d'application à l'étranger du principe technique de Cascad[70]. Ce concept a été mis en œuvre pour l'entreposage de combustibles HTGR[71] sur le site de Fort St. Vrain (Colorado, USA), mis en exploitation en 1991, et pour l'entreposage de combustibles usés de type VVER[72] en Hongrie, mis en exploitation en 1997, pour une durée de 50 ans. La conception est modulaire. L'entrepôt hongrois comporte ainsi à ce jour trois modules (Figure 3.3-8).

[70] La conception de l'entrepôt a été réalisée par GEC Alsthom.
[71] High Temperature Gas Cooled Reactor.
[72] Filière de réacteurs d'origine russe proche des REP.

Les combustibles usés (nus ou en étui) sont entreposés dans des puits fermés. L'évacuation de la chaleur est assurée par une ventilation autour de ces puits par convection naturelle. Chaque puits n'accueille qu'un seul assemblage combustible.

Figure 3.3-8 *L'entrepôt hongrois de combustibles usés : en haut à droite, hall de manutention durant une opération de contrôle ; en bas à gauche, puits d'entreposage sous la dalle de radioprotection ; en bas à droite, têtes des puits d'entreposage (source Puram)*

3.3.2.4 Le bâtiment 136 du Centre de Dessel (Belgique)

Le bâtiment 136 du Centre de Dessel (Figure 3.3-9), mis en service en 1995, comporte trois parties :

- une casemate d'entreposage de colis de déchets HA ;
- une casemate d'entreposage des colis MAVL ;
- un atelier commun de déchargement des emballages de transport.

L'architecture est modulaire et la réserve foncière permettrait la construction de 15 modules. Le radier de fondation est situé 1,2 m au-dessus du plus haut niveau de la nappe phréatique.

Figure 3.3-9 *Le bâtiment 136 du Centre de Dessel (source Ondraf)*

Casemate d'entreposage HA

La casemate d'entreposage HA, d'une capacité de 600 colis CSD-V, comporte 60 puits en acier inoxydable de 17 m de hauteur, posés sur le radier, dans lesquels peuvent être empilés 10 colis. La circulation de l'air de ventilation s'effectue, directement au contact des conteneurs, comme dans l'AVM ou R7/T7.

En partie inférieure, les puits sont équipés d'amortisseurs de chute.

Les parois extérieures de la casemate HA sont constituées de deux épaisseurs de béton, séparés par un jeu afin de désolidariser le voile externe (exposé directement aux agressions externes, telle une situation accidentelle d'impact d'un avion de chasse à une vitesse de 150 $m.s^{-1}$) du voile interne. La structure en béton fortement armé a une épaisseur cumulée de 1,7 m suffisante pour assurer la radioprotection.

En partie supérieure de la fosse, la dalle de radioprotection en béton armé présente aussi une épaisseur de 1,70 m.

La ventilation de la fosse d'entreposage est mécanique, A l'entrée, l'air est préchauffé pour abaisser son humidité relative et filtré (filtration simple : poussières, aérosols). Depuis le plénum inférieur, l'air entre dans la partie inférieure des puits par des orifices circulaires découpés dans la tôle (virole crépinée). Il balaie les puits sur toute leur hauteur. En sortie, le circuit d'air est doté d'un filtre de très haute efficacité. L'air est extrait du plénum supérieur dans lequel débouche l'ensemble des puits contenant des colis CSD-V. Les autres sont provisoirement obturés, à l'aide d'un bouchon en béton. La dépression en sortie est de 170 Pa et le débit de 21 000 $m^3.h^{-1}$.

La manutention des colis CSD-V dans le hall de manutention est effectuée à l'aide d'une hotte de radioprotection. Cette hotte est dans un premier temps posée par un pont transbordeur sur le puits, par l'intermédiaire d'un operculaire à tiroir. Après retrait du bouchon de radioprotection et du bouchon qui obture la ventilation des puits vides, une deuxième manœuvre permet d'introduire le colis dans le puits. La manutention est effectuée par un opérateur à partir d'un poste situé sur le pont transbordeur. Le hall de manutention est donc accessible dans toutes les phases d'exploitation.

Une surveillance des colis et des installations par l'intermédiaire d'échantillons de matériaux placés dans un porte échantillons d'une géométrie semblable à celle des colis CSD-V, à placer en puits d'entreposage, a été conçue.

Des tubes guides qui débouchent au niveau de la dalle du hall de manutention parcourent l'espace intérieur qui sépare les puits d'entreposage. Des sondes de température, débit de doses, etc. peuvent y être introduites pour observation.

La casemate d'entreposage MAVL

La casemate d'entreposage MAVL, est un hall en béton armé fermé par une porte-herse en béton armé également. Elle est desservie par un pont roulant qui peut être extrait du hall pour maintenance.

Les colis MAVL sont disposés par empilement direct ou regroupés dans des paniers qui sont empilés. Les colis CSD-C sont placés par 4 dans des racks superposés sur 3 niveaux. La manutention des colis MAVL est télé-opérée et la zone de manutention n'est pas accessible.

L'atelier de déchargement des emballages de transport

L'atelier de déchargement des emballages de transport est divisé en 3 halls. Dans le premier, les emballages de transport sont redressés en position verticale par un pont supérieur, sur un wagon muni d'une structure anti-renversement (parasismique). Dans le deuxième, une cellule permet le prélèvement d'un échantillon de gaz interne à l'emballage pour le contrôle de l'absence de contamination radioactive, avant son ouverture. Le troisième donne accès par une trappe supérieure aux casemates d'entreposage.

C'est dans ce hall qu'est effectuée l'ouverture des emballages de transport. Il est fermé par une porte en béton armé d'épaisseur 0,8 m.

3.3.2.5 Habog (Pays-Bas)

Habog (Figure 3.3-10), mis en service en 2003, est conçu[73] pour recevoir les déchets HA et MAVL des réacteurs néerlandais de Borssele traités à La Hague et de Dodewaard traités à Sellafield, ainsi que des combustibles usés du réacteur de Delft. L'installation se caractérise par une diversité des procédés d'entreposage mis en œuvre. Elle peut réceptionner huit types d'emballages de transport et accueillir douze types différents de colis de déchets.

Les déchets sont répartis suivant leur caractère exothermique ou non. Les déchets bitumés sont séparés des déchets irradiants.

L'installation se divise ainsi en différents alvéoles d'entreposage pour respectivement les déchets HA vitrifiés et combustibles usés, les déchets de structure de combustibles, les déchets technologiques cimentés et les déchets bitumés. Un alvéole est maintenu vide en réserve.

Pour les déchets HA, 120 puits d'entreposage étanches, remplis d'argon, renferment des colis de déchets vitrifiés et d'éléments combustibles en étuis inertés à l'hélium. La présence d'hélium dans l'argon révèlerait une perte d'étanchéité des étuis. Les puits sont refroidis par une ventilation naturelle. La manutention s'effectue sans hotte, à l'image de Cascad (Figure 3.3-11).

Les déchets MAVL sont classiquement gerbés sur dalle.

L'installation est prévue pour une durée d'exploitation de 100 ans. Pour cela, elle comprend notamment des alvéoles libres afin de pouvoir y placer des colis qui seraient retirés d'un autre alvéole en vue d'une inspection et d'une réparation éventuelle. Des spécifications ont été définies pour assurer la meilleure longévité possible aux structures. Ainsi un béton a été formulé pour une résistance[74] de 50 MPa afin de réduire les effets de la dilatation thermique et de tenir compte de ceux du rayonnement. L'installation est aussi conçue pour résister au séisme, à la chute d'avion, à l'inondation et à l'explosion externe.

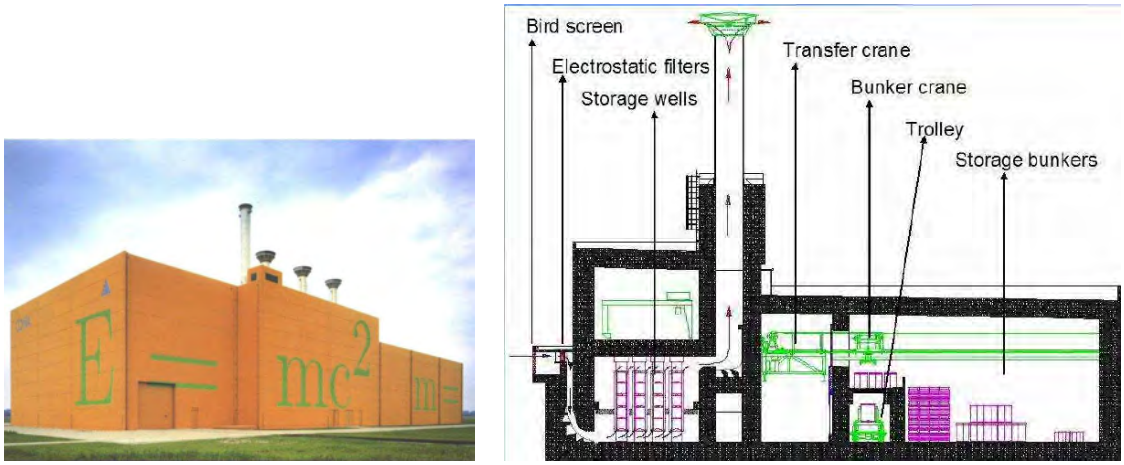


Figure 3.3-10 Habog : à gauche, vue extérieure du bâtiment ; à droite, section verticale (source COVRA)

[73] Habog a été conçu par Areva (SGN) pour le concept de base, à partir de l'expérience acquise sur des installations françaises à La Hague et à Cadarache, par COVRA, pour certains aspects spécifiques, dont la sûreté-criticité, par HBKC (société néerlandaise de génie civil), pour les travaux de génie civil, et notamment ceux concernant la prise en compte des risques de séisme, de chute d'avion et d'inondation.

[74] Cette résistance est proche du seuil de 60 MPa caractérisant des bétons haute performance.

Figure 3.3-11 Vues intérieures de Habog : à gauche, hall de manutention des déchets HA, au centre, introduction d'un colis HA dans un puits d'entreposage, à droite, exemple de diversité des types de colis accueillis

3.3.3 Procédés d'entreposage à sec peu pratiqués en France

Certains procédés d'entreposage à sec sont largement utilisés dans d'autres pays tout en n'étant pas ou peu pratiqués en France. Ils ont été développés pour entreposer des combustibles usés. Néanmoins, ils sont aussi utilisés pour l'entreposage de déchets HA vitrifiés dans des pays ayant historiquement traité une partie de leurs combustibles.

3.3.3.1 L'entreposage à sec de combustibles usés ou de déchets HA en emballages métalliques de transport (Allemagne, Suisse…)

En Allemagne, les combustibles usés ainsi que les colis de déchets HA vitrifiés sont entreposés dans des emballages de transport et d'entreposage Castor[75, 76].

Le corps d'un emballage Castor est constitué de fonte ductile d'épaisseur 30 à 40 cm. Sa longueur est d'environ 6 m, son diamètre de 2 m, et la masse en charge atteint 140 tonnes.

Les emballages sont placés verticalement dans un bâtiment d'entreposage au moyen d'un pont roulant. Le bâtiment assure la protection contre les intempéries et les intrusions, alors que les fonctions de confinement et de sûreté-criticité sont réalisées par les emballages. Compte tenu de la forte densité d'entreposage, la protection vis-à-vis de l'irradiation externe assurée par les emballages est complétée par les voiles de l'entrepôt. La chaleur est dissipée par la grande surface d'échange de l'emballage équipée d'ailettes et par la ventilation naturelle de l'entrepôt.

Deux options de conception d'entrepôts se distinguent. Le concept « WTI/GNS » (Figure 3.3-12) est mis en œuvre sur les sites d'entreposage centralisé de Ahaus et Gorleben ; il est ou sera aussi utilisé sur les sites des centrales de Biblis, Grafenrheinfeld, Gundremmingen, Isar et Philippsburg.

---

75 Les emballages Castor sont produits par l'allemand GNS ainsi que par le tchèque Skoda.

76 L'Allemagne a aussi développé le concept d'un emballage à triple usage : transport, entreposage et stockage en formation géologique profonde. Il est dénommé « Pollux ». Le site de Gorleben comprend un atelier de conditionnement conçu pour désassembler les combustibles et en permettre une compaction, puis les placer dans des emballages Pollux. A ce jour, cet atelier n'a pas reçu l'autorisation nécessaire à son exploitation. Aussi seul l'emballage Castor est aujourd'hui utilisé industriellement en Allemagne pour l'entreposage de combustibles usés.

Le concept « STEAG » (Figure 3.3-13), renforcé sur le plan de la radioprotection et de la résistance à la chute d'avion au moyen de voiles et d'une dalle de toit plus épais, est ou sera mis en œuvre sur les sites des centrales nucléaires de Brokdorf, Brunsbüttel, Grohnde, Krümmel, Lingen et Unterweser (Thomauske, 2003).

La hauteur de levage des emballages est faible, minimisant la hauteur de chute en cas de lâcher de charge. Un couloir de manutention permet de limiter à quatre (concept WTI/GNS) ou cinq (concept STEAG) le nombre d'emballages à déplacer pour accéder à chaque emballage entreposé.

Sur le site de la centrale de Neckarwestheim, l'entrepôt accueillant depuis 2006 les emballages de combustibles usés est constitué de deux tunnels à faible profondeur (15 m), de longueurs respectives 84 et 90 m (Figure 3.3-14, repères 2 et 3). L'architecture souterraine de l'entrepôt exploite la configuration particulière du site. Une cheminée extrait l'air de ventilation (repère 5).

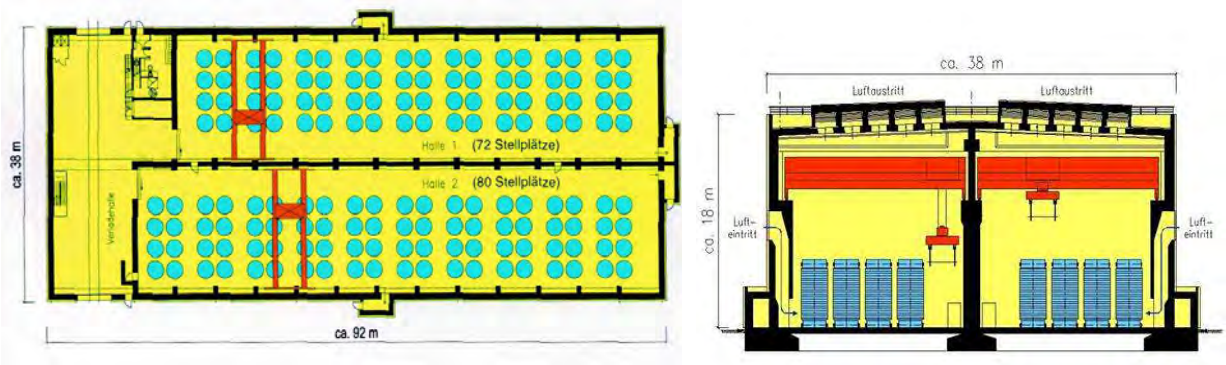


Figure 3.3-12 Concept d'entrepôt WTI/GNS (source BfS)

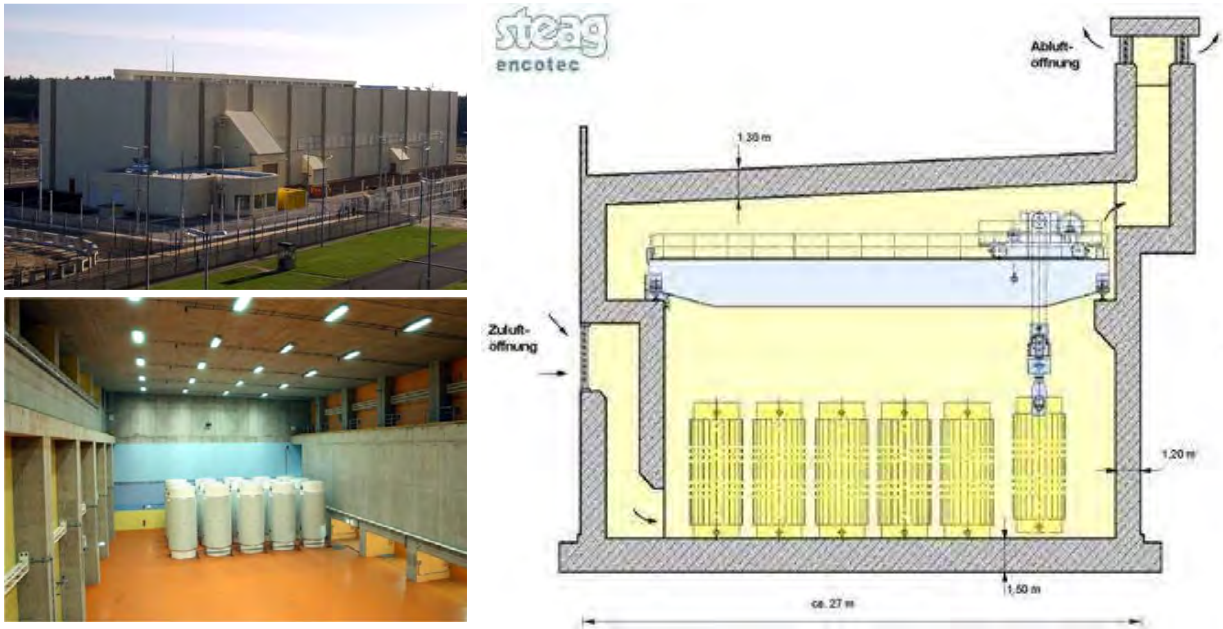


Figure 3.3-13 Concept d'entrepôt STEAG pour combustibles usés ; à gauche, photographies du bâtiment d'entreposage du site de Lingen (source BfS)

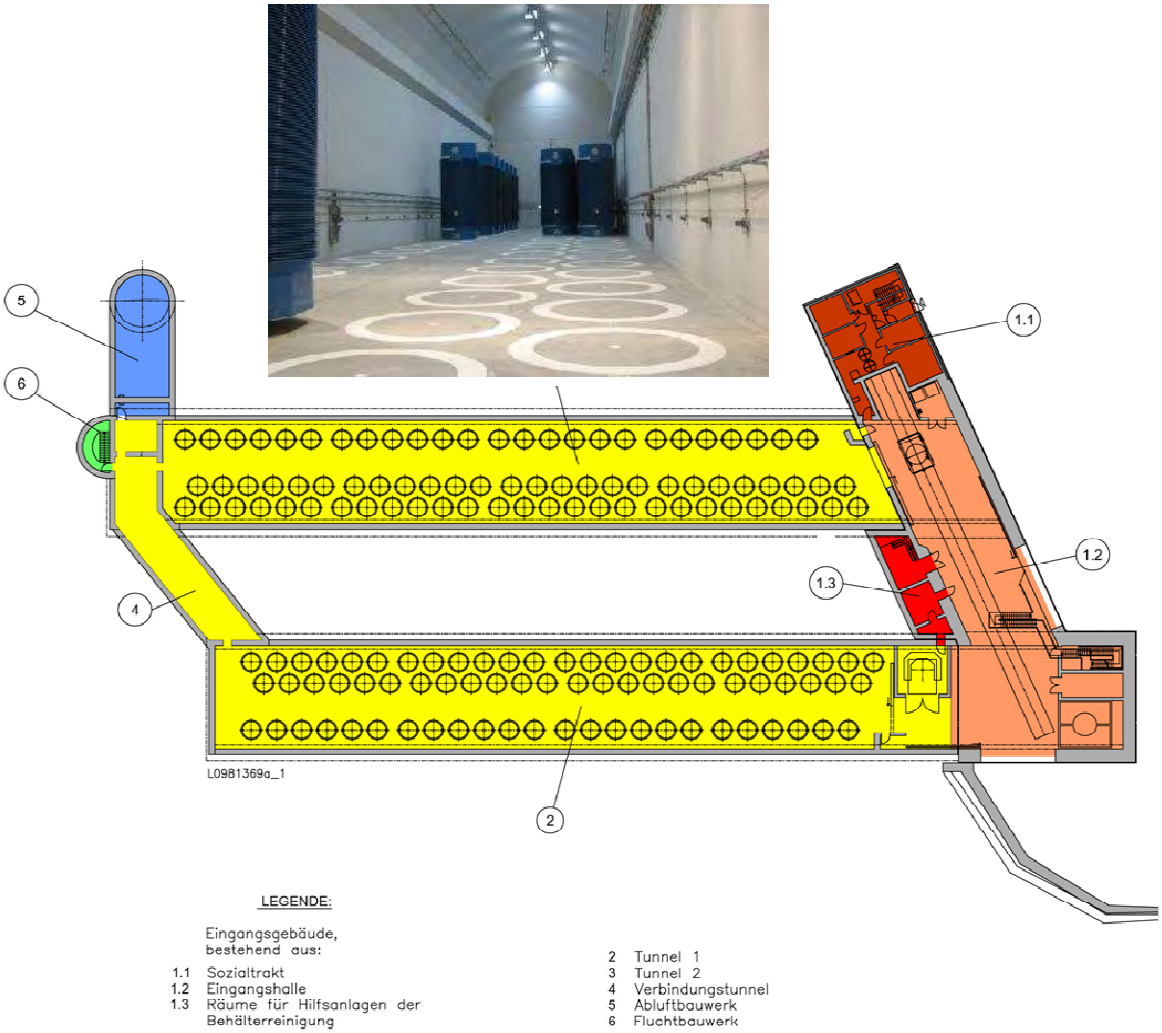


Figure 3.3-14 Plan masse de l'entrepôt à faible profondeur de Neckarwestheim (source BfS)

Sur les sites où les entrepôts ci-dessus ne sont pas encore opérationnels, des entreposages d'appoint (Temporary storage facility), de courte durée, sont prévus ou déjà réalisés, selon une technique permettant une construction rapide, en un ou deux mois. Il s'agit de modules en béton armé équipés d'un couvercle, accueillant chacun un emballage Castor (Figure 3.3-15).

Figure 3.3-15 Entreposage d'appoint à la centrale de Neckarwestheim

Le procédé d'entreposage en emballages Castor est également utilisé en République tchèque (installation d'entreposage des combustibles usés de la centrale VVER de Dukovany) et en Lituanie[77] (centrale RBMK[78] de Ignalina).

En Suisse, l'entrepôt de combustibles usés et de déchets HA vitrifiés géré par ZWILAG (Würenlingen) est comparable au concept allemand en surface. Le hall d'entreposage de longueur 68 m et de largeur 41 m peut accueillir 200 emballages de transport et d'entreposage de la famille TN 24[79] (Figure 3.3-16). Le Zwibez (centrale de Beznau) est capable de recevoir jusqu'à 48 emballages de transport et d'entreposage de combustibles usés et de déchets HA vitrifiés.

Figure 3.3-16 Entreposage à sec en Suisse (ZWILAG) ; à droite, divers emballages de la famille TN24 utilisés par ZWILAG (source Areva)

L'entreposage de combustibles usés en emballages de transport est aussi pratiqué sur les sites de Doel[80] et de Dessel[81] en Belgique, sur certains sites de centrales aux Etats-Unis (avec divers types d'emballages) et sur le site de la centrale de Trillo en Espagne[82] (Figure 3.3-17).

Les emballages utilisés à Trillo (de type ENSA-DPT) comprennent deux enveloppes en acier inoxydable séparées par une épaisseur de plomb.

Un entrepôt à sec de combustibles usés en emballages en acier épais est projeté au Japon à l'horizon 2014, à proximité de Rokkasho-Mura, pour conserver les combustibles usés jusqu'à ce qu'ils puissent être traités[83].

---

77 Les emballages utilisés en Lituanie dont de types « Castor » et « Constor » pour combustibles RBMK, tous deux fournis par GNS.

78 filière de réacteur d'origine russe, à l'uranium faiblement enrichi (2,6 % de ^{235}U) modéré au graphite et avec l'eau légère bouillante comme fluide caloporteur.

79 Les emballages de la famille TN24 sont conçus et fournis par TN International (Areva).

80 Les bâtiments de Doel dans leur configuration actuelle peuvent recevoir 165 emballages. Des modules additionnels peuvent être construits si nécessaire.

81 Le bâtiment 156 de Dessel peut accueillir sept emballages Castor pour entreposer les combustibles usés du réacteur BR3 du CEN·SCK.

82 En Espagne, seule la centrale de Trillo a déjà nécessité de compléter les piscines d'entreposage du réacteur par une installation nouvelle. L'entrepôt à sec de Trillo a une capacité de 80 emballages contenant chacun 21 assemblages de combustibles usés.

83 Le projet, prévu dans la commune de Mutsu, province d'Aomori, abritera 500 emballages.

Figure 3.3-17 Entreposage à sec de combustibles usés sur le site de centrale de Trillo (Espagne)

3.3.3.2 L'entreposage à sec de combustibles usés en modules NUHOMS® (USA…)

Une grande partie des combustibles usés entreposés à sec aux Etats-Unis le sont dans des petites casemates modulaires dénommées « NUHOMS® » [84]. Le système NUHOMS® est compose d'une part de casemates d'entreposage en béton armé, d'autre part de conteneurs métalliques. Un emballage de transfert blindé est utilisé pour amener chaque conteneur jusqu'à la casemate qui l'accueillera individuellement. Le conteneur est introduit horizontalement dans la casemate module. Cette dernière assure la protection vis-à-vis de l'irradiation externe, la protection mécanique du conteneur et l'évacuation de la chaleur par une circulation d'air thermo-convective : l'air extérieur pénètre à la base de la casemate et s'extrait en partie supérieure. Le conteneur métallique réalise le confinement et la sûreté-criticité. Sa surface d'échange assure le transfert de chaleur à l'air de refroidissement.

Le système présente une grande souplesse d'utilisation. Des casemates peuvent être ajoutées dans un temps relativement court au fur et à mesure de nouveaux besoins. En 2007, plus de 325 conteneurs NUHOMS® étaient exploités aux Etats-Unis et 140 unités supplémentaires prévues. Cette technique est utilisée dans d'autres pays, par exemple sur le site de la centrale VVER de Metzamor en Arménie.

La durée d'entreposage prévue est d'au moins 100 ans, en attente de traitement des combustibles. Chaque assemblage sera d'abord conditionné dans un étui individuel scellé assurant une première barrière de confinement, avant d'être introduit dans les conteneurs.

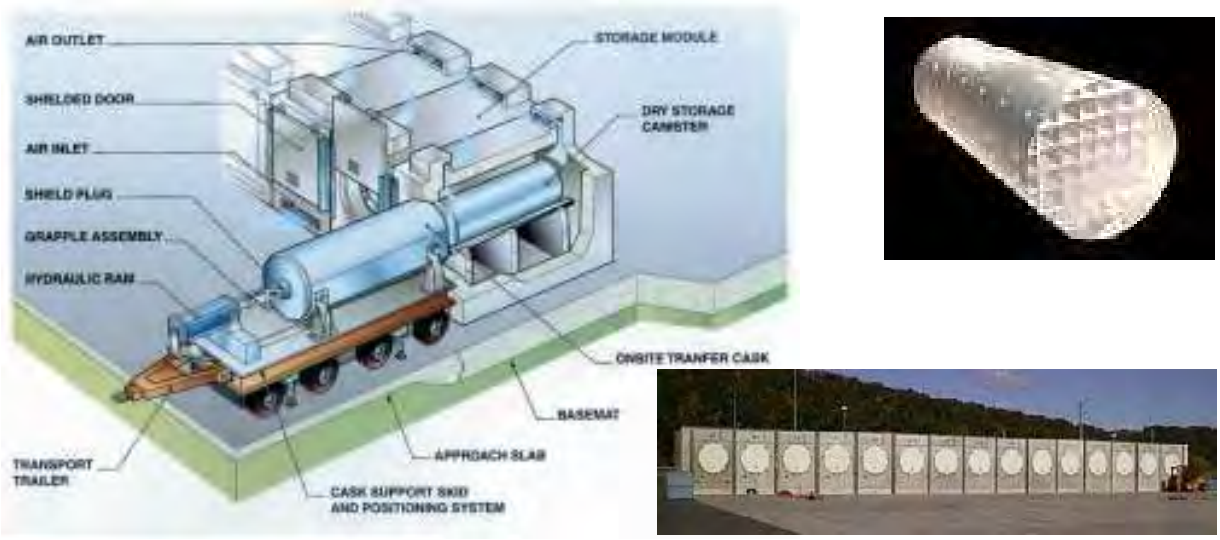


Figure 3.3-18 Entreposage à sec de combustibles usés en modules « NUHOMS® » (source Areva)

[84] Les NUHOMS® sont commercialisés par Areva.

3.3.3.3 L'entreposage à sec de combustibles usés en conteneurs de béton (Canada, Argentine)

Les combustibles usés à l'uranium naturel Candu se caractérisent par un volume important au regard de l'énergie produite, et, corollairement, par un dégagement thermique très inférieur aux combustibles REP ou aux déchets HA issus du traitement de combustibles REP. Cette situation explique l'originalité des concepts d'entreposage développés au Canada.

Après une décroissance thermique de 30 kW à 5 W par assemblage[85] en piscine, les combustibles sont placés dans des conteneurs d'entreposage à sec. Trois types de conteneur sont utilisés industriellement au Canada, assurant le confinement des combustibles et la protection vis-à-vis de l'irradiation externe.

Un conteneur développé par OPG[86] présente une capacité unitaire 384 assemblages Candu pour une masse totale 75 tonnes (dont 8,8 tonnes de combustible). Ce conteneur possède des parois en béton armé entre deux coquilles en acier. Le revêtement intérieur constitue l'enveloppe de confinement alors que le revêtement extérieur vise à accroître l'intégrité de la structure et à faciliter la décontamination de la surface du conteneur. Les conteneurs OPG sont placés dans un bâtiment métallique les protégeant des intempéries (Figure 3.3-19).

Un conteneur en béton appelé aussi « silo » a été développé par EACL. Sa capacité varie selon le site d'utilisation (de 1,9 à 10,3 tonnes de combustible, Figure 3.3-20). En 2007, 420 conteneurs étaient opérationnels, dont 140 sur le site de la centrale nucléaire de Point Lepreau au Canada et 200 sur celui de Wolsong en Corée du sud. Les conteneurs sont placés verticalement sur un radier de béton sans nécessiter de protection vis-à-vis des intempéries (Figure 3.3-21). Ils sont chargés sur place, en ouvrant le bouchon situé en partie supérieure et en y descendant les assemblages regroupés en paniers en acier inoxydable. La dissipation de la chaleur (de l'ordre de 1 à 2 kW) s'effectue par conduction dans les parois épaisses du conteneur, puis rayonnement et convection naturelle autour du conteneur, qui offre une grande surface d'échange avec l'extérieur. Le portique de manutention donne accès au contenu de chaque silo indépendamment des autres.

Enfin EACL a aussi développé une casemate modulaire en béton appelée « Macstor » (Figure 3.3-22) de capacité 12 000 assemblages Candu (en 200 paniers).

Comme les conteneurs en béton ci-dessus, les casemates sont placées à ciel ouvert et chargées sur place par un portique. A l'intérieur d'une casemate, les paniers sont empilés dans des puits cylindriques métalliques. Ces puits sont étanches et leur atmosphère interne peut être contrôlée par prélèvement, permettant de surveiller la première barrière constituée par le gainage des combustibles. La dissipation de la chaleur (60 kW environ) s'effectue par une convection d'air autour des puits, l'air de refroidissement étant prélevé à l'extérieur en partie basse de la casemate module et rejeté en partie haute. Des chicanes interrompent le rayonnement gamma direct. Les puits évitent un contact de l'air avec les assemblages. Huit modules Macstor étaient exploités en 2007.

Le principe de ces casemates peut être rapproché de celui des NUHOMS® présentés plus haut ; cependant le mode de manutention des assemblages est vertical et non horizontal, et la casemate assure ici une fonction de confinement.

[85] Chaque assemblage Candu a une longueur de 50 cm et un diamètre de 10 cm.
[86] Le conteneur OPG est utilisé sur les sites des centrales de Pickering, Bruce et prochainement Darlington.

Figure 3.3-19 Conteneurs d'entreposage développés par OPG (DSCs) [source EACL]

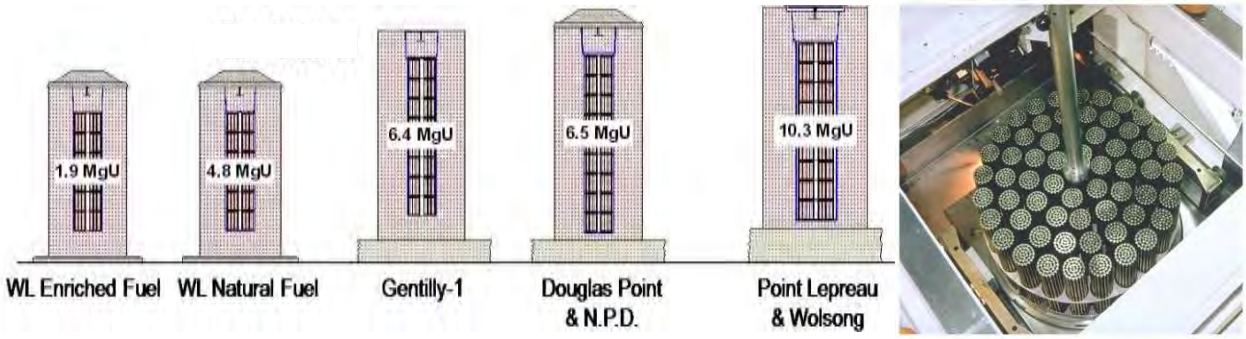


Figure 3.3-20 Conteneurs d'entreposage en béton développés par EACL et utilisés sur différents sites canadiens ; à droite, panier d'assemblages Candu avant introduction dans un conteneur (source EACL)

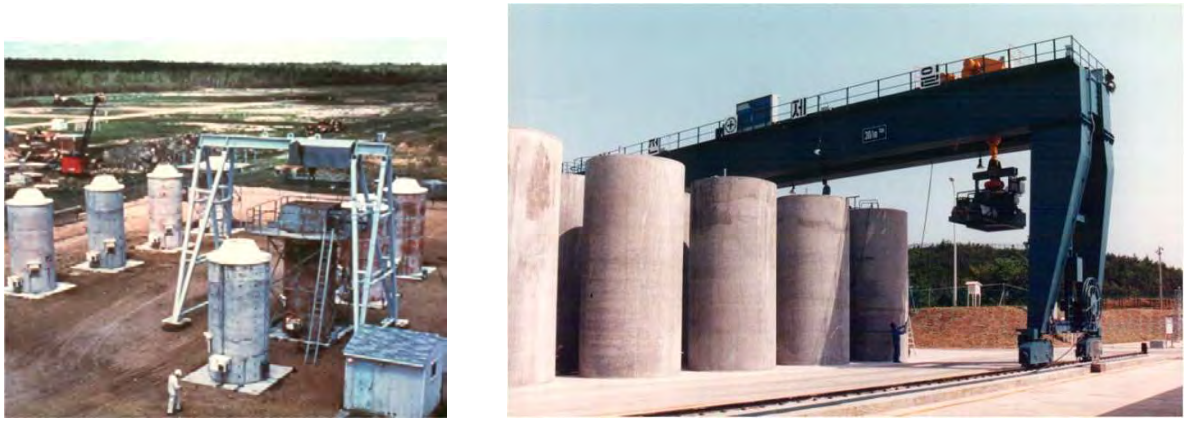


Figure 3.3-21 Conteneurs d'entreposage en béton EACL, à gauche sur le site de Whiteshell (WL), à droite sur le site de Wolsong (source EACL)

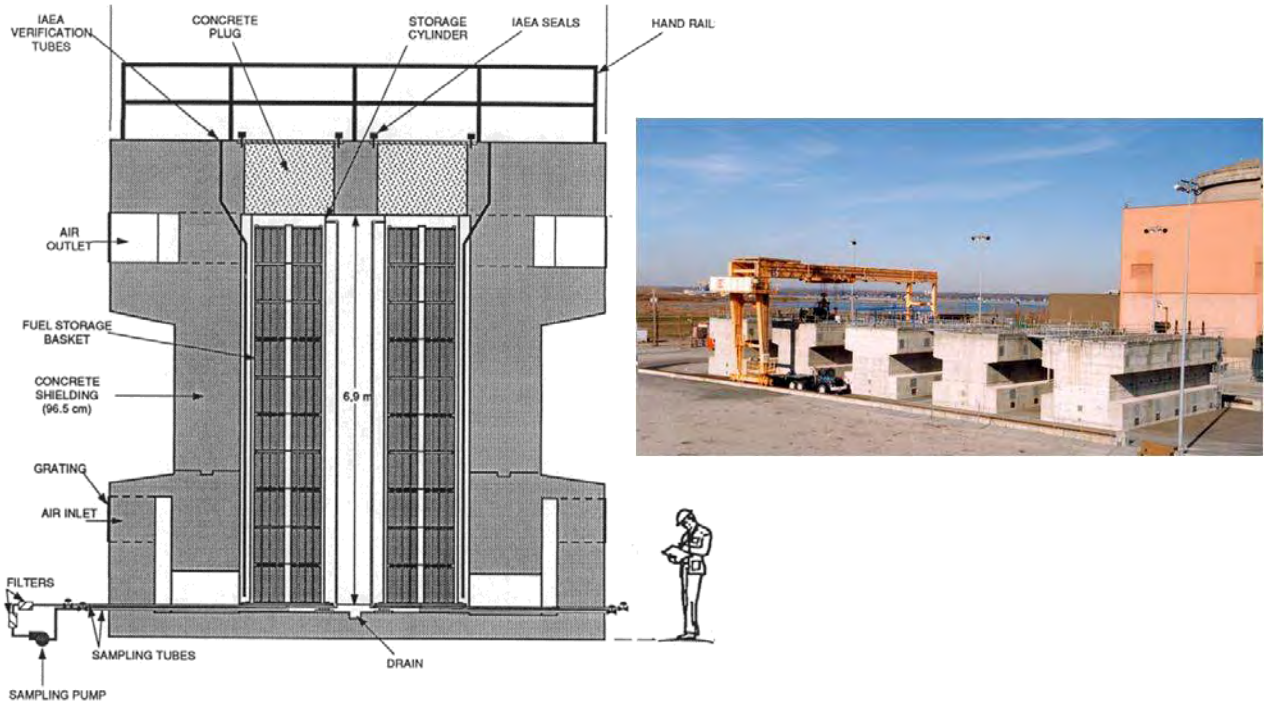


Figure 3.3-22 Module d'entreposage EACL « Macstor » : à gauche, section verticale et principe de fonctionnement ; à droite, modules exploités sur le site de Gentilly 2 (source EACL)

L'option d'entreposage à sec développée par l'EACL est utilisée dans d'autres pays utilisant des réacteurs Candu. C'est le cas de la Roumanie où les combustibles usés de la centrale de Cernavoda sont entreposés dans des modules Macstor et de l'Argentine où les combustibles usés de la centrale nucléaire de Embalse sont entreposés sur le site en conteneurs[87] en béton similaires à ceux exploités au Canada (Figure 3.3-23).

Par ailleurs, une installation d'entreposage de combustibles usés fondée sur des conteneurs combinant acier et béton est envisagée sur le site de la centrale espagnole José Cabrera.

Figure 3.3-23 Conteneurs d'entreposage en béton pour combustibles Candu sur le site de Embalse [source Comision nacional de energia atomica – Argentina]

[87] Le même type de conteneur est envisagé pour entreposer les tubes de pression qui seront remplacés pendant l'opération d'extension de la durée d'exploitation du réacteur de Embalse (de 30 à 60 ans). Un réacteur Candu comporte plusieurs centaines de tubes de pression contenant l'uranium, immergés dans l'eau lourde sous pression. Après retrait du réacteur, ces tubes de pression sont considérés comme des déchets HA.

4

Le stockage réversible en formation géologique profonde

4.1	*Fonctions de sûreté du stockage*	*108*
4.2	*La réversibilité du stockage*	*110*
4.3	*Colis de stockage*	*112*
4.4	*Architecture de stockage*	*118*
4.5	*Première esquisse de chronique de stockage présentée en 2009, simulations exploratoires*	*122*
4.6	*Chroniques de mise en stockage du programme industriel de gestion des déchets (2012)*	*136*

« Après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde » (loi de programme du 28 juin 2006).

Ce stockage est étudié dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, investiguée au moyen du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Le dossier remis par l'Andra en 2005 et les évaluations scientifiques qui en ont été faites ont montré la faisabilité de principe du stockage dans la couche étudiée. Cette faisabilité reposait sur des concepts techniques simples et robustes. Les études et recherches menées depuis ont exploré des pistes d'optimisation et précisé les exigences applicables en vue de la conception d'un avant-projet du centre industriel de stockage ; les études de conception industrielle du projet Cigéo ont été initiées en 2011.

Les études de conception industrielle permettront progressivement de préciser la description technique des installations. Le débat public sur le projet sera tenu en 2013. Intégrant les enseignements de ce débat, l'Andra remettra un dossier de demande d'autorisation de création du centre de stockage en 2015. Le Parlement devra ensuite se prononcer sur les conditions de la réversibilité du stockage, avant que le Gouvernement ne puisse décider la création du centre, conformément aux conditions fixées par la loi. Sous réserve d'autorisation, sa mise en exploitation est envisagée par la loi de programme du 28 juin 2006 à l'horizon 2025.

Ce chapitre rappelle d'abord les fonctions de sûreté du stockage ; si ces fonctions présentent des similitudes avec celles d'un entreposage dans une première période, elles deviennent spécifiques au-delà. Il présente ensuite l'état des propositions de l'Andra sur la réversibilité. Puis il expose les solutions techniques étudiées pour accueillir les déchets HA et MAVL présentés au chapitre 2 et répondre aux exigences de sûreté et de réversibilité : conteneurs de stockage et installations en souterrain et en surface.

Enfin, il rend compte des études menées en matière d'ordonnancement de la mise en stockage (voir le chapitre 1) :

- esquisse d'un scénario possible de mise en stockage présentée en 2009 pour illustrer la complémentarité de l'entreposage et du stockage ;
- chroniques de mise en stockage du PIGD élaborées dans la phase 2010-2012.

4.1 Fonctions de sûreté du stockage

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

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

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

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

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

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

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

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

- Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines.
  Le stockage en profondeur met les déchets à l'abri de phénomènes d'érosion et des activités humaines courantes, qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain.
- S'opposer à la circulation d'eau, limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage, retarder et atténuer la migration des radionucléides.
  Les formations géologiques profondes sont saturées en eau. L'arrivée d'eau et son renouvellement au voisinage des déchets constituent le principal risque à long terme d'endommagement des colis, susceptible d'aboutir au relâchement de radionucléides ou de toxiques chimiques à l'intérieur du stockage. Cette eau constitue aussi un vecteur potentiel de transport des radionucléides.

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

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

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

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

Une fonction de sûreté complémentaire concerne le maintien, à long terme, de la maitrise de la criticité.

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

4.2 La réversibilité du stockage

Dans le cadre du projet international « Reversibility and Retrievability » mené de 2007 à 2011, l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN) a établi des définitions en matière de réversibilité[88].

La récupérabilité désigne ainsi « *la capacité à récupérer des déchets seuls ou sous forme de colis après leur mise en place dans un stockage, indépendamment de l'exercice effectif de cette capacité. Au cours de chaque phase du cycle de stockage, le retrait des déchets est facilité du fait de leur confinement (non-dispersion) et de leur conditionnement dans un volume restreint, caractéristique de tout stockage géologique. Dans un avenir lointain, les déchets seront toujours récupérables, même si les coûts et les efforts nécessaires augmenteront au fil du temps. La récupérabilité est donc plus une question de degré d'effort à consentir que de possibilité ou non de récupérer les déchets* ».

La réversibilité désigne « *la capacité à revenir sur des décisions prises lors de la mise en œuvre progressive d'un système de stockage, indépendamment de l'exercice effectif de cette capacité. Elle implique que le processus de mise en œuvre et les technologies soient suffisamment flexibles pour pouvoir si nécessaire, à tout moment au cours du programme, inverser ou modifier, sans effort démesuré, une ou plusieurs décisions prises antérieurement* ».

[88] Compréhension internationale des notions de réversibilité des décisions et de récupérabilité des déchets dans un stockage géologique, AEN, novembre 2011 & Réversibilité des décisions et récupérabilité des déchets radioactifs – Eléments de réflexion pour les programmes nationaux de stockage géologique. OCDE/AEN, 2012. Disponibles sur www.oecd-nea.org/rwm/rr

L'échelle internationale de récupérabilité issue du projet AEN offre un cadre pertinent pour caractériser les étapes du processus qui mène à la fermeture du stockage (Figure 4.2-1). Le niveau 1 de l'échelle concerne l'entreposage des colis de déchets avant leur stockage. Au niveau 2, les déchets auront été transportés du lieu d'entreposage vers le site de stockage puis ils auront été transférés dans les ouvrages souterrains. Au niveau 3, les alvéoles de stockage sont obturés. Au niveau 4, les galeries d'accès sont remblayées et/ou scellées. Au niveau 5, le stockage est fermé. L'accès depuis la surface est scellé et les installations de surface sont démantelées. Le niveau 6 désigne l'état final du stockage. Même si l'intégrité des colis de déchets ne peut plus être garantie, les déchets sont toujours confinés à l'intérieur de l'installation. La sûreté ne dépend plus d'une maintenance ou d'un suivi. L'échelle traduit la complexité croissante d'une récupération éventuelle de colis avec les étapes de fermeture et avec le temps.

La loi de programme du 28 juin 2006 stipule que la réversibilité devra être assurée pour une durée ne pouvant être inférieure à 100 ans, et qu'une nouvelle loi sera ensuite nécessaire pour décider la fermeture définitive du stockage.

L'Andra propose que Cigéo soit conçu de façon à permettre :

- le maintien des options de gestion du stockage aussi ouvertes que possible dans le respect des exigences de sûreté, de sécurité et de protection de l'environnement et en tenant compte des facteurs techniques et économiques ;
- l'exploitation du retour d'expérience pour une optimisation continue de la conception et de l'exploitation du stockage.

Pour cela les installations de Cigéo seront développées progressivement par tranches, de manière flexible pour permettre des évolutions de conception. La fermeture sera réalisée progressivement par étapes avec la possibilité technique de temporiser chaque étape. Ces principes reposent sur une modularité et une adaptabilité des installations, la durabilité des ouvrages de stockage, l'accessibilité aux colis, la maintenabilité des ouvrages d'accès, en tenant compte des facteurs techniques et économiques. Les installations seront également être conçues de manière à faciliter d'éventuelles opérations de récupération de colis.

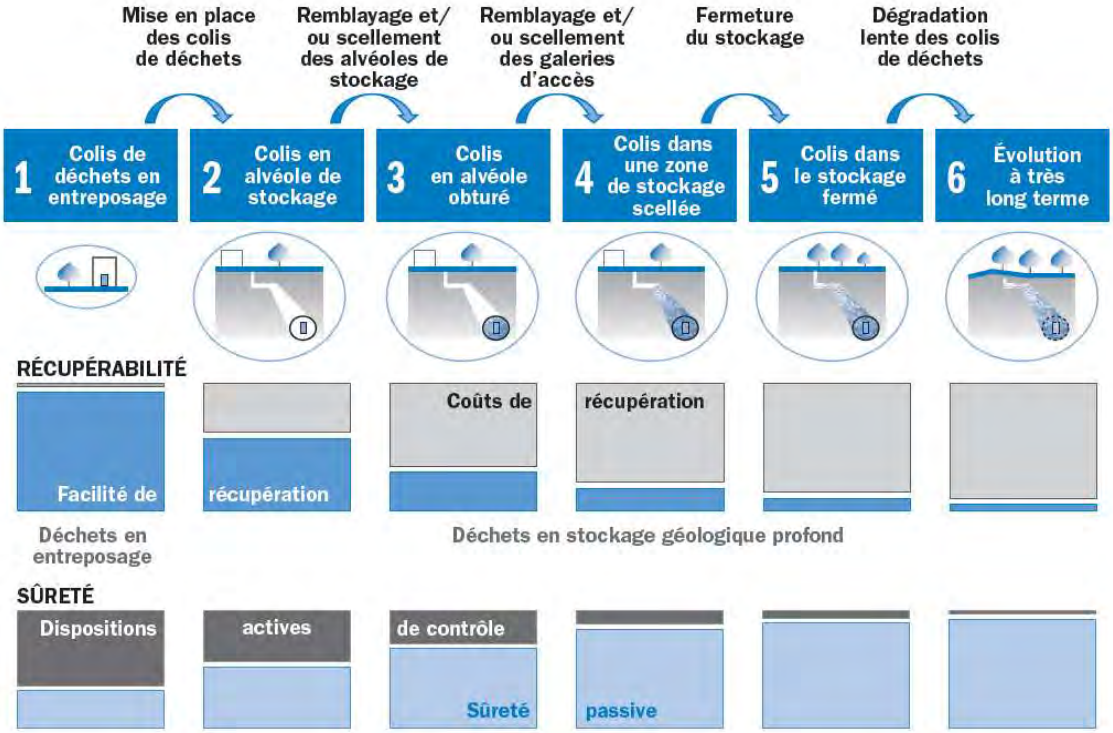


Figure 4.2-1 Echelle internationale de récupérabilité (AEN)

L'Andra propose d'établir et de tenir à jour, jusqu'à la fermeture définitive, un schéma directeur de l'exploitation et de la fermeture de Cigéo. Celui-ci programmera les jalons de mise en stockage de nouvelles familles de colis de déchets ainsi que les étapes prévisionnelles de fermeture qui modifient le degré de récupérabilité dans l'échelle internationale. Chaque étape pourra faire l'objet d'un processus de décision et d'autorisation spécifique. Le schéma directeur donnera aux parties prenantes une visibilité sur les décisions structurantes au cours du processus de stockage après la mise en service. Les parties prenantes pourront ainsi être associées avant chacune de ces décisions. Le schéma pourra être révisé régulièrement en fonction des décisions prises, typiquement suivant une périodicité de dix ans.

Dans l'éventualité d'une décision de retrait de colis de déchets stockés, les colis concernés devront être gérés en fonction de leur nouvel exutoire : entreposage, stockage ou le cas échéant nouveau mode de gestion. Cette question concerne particulièrement le cas de colis qui seraient retirés en grand nombre. La préparation et la construction des nouvelles installations qui seraient nécessaires dans une telle situation seraient effectuées avant de procéder à la récupération des colis ; ces nouvelles installations seraient alors adaptées spécifiquement aux besoins de la situation considérée. Dans le cas où le retrait des colis serait suivi d'une évacuation hors du site, on préserve dans la conception des installations de surface de Cigéo la possibilité de leur adjoindre ultérieurement des ateliers de reconditionnement et de réexpédition en cas de besoin.

L'observation et la surveillance du stockage concourent au processus décisionnel relié à la réversibilité, en apportant des éléments concrets sur le fonctionnement de l'installation et sur sa conformité aux prévisions, ainsi que sur l'évolution des conditions de réversibilité. En particulier l'observation de l'évolution des ouvrages permettra de réévaluer la durée de réversibilité au cours du temps, compte tenu des marges adoptées dans les dimensionnements.

La réversibilité donne au stockage la capacité d'offrir les mêmes possibilités de choix de gestion des colis de déchets qu'une installation d'entreposage, sur une durée au moins du même ordre. De plus, la création du stockage offre la possibilité de pouvoir à terme le fermer, évitant alors de laisser la charge des déchets aux générations futures tout en pérennisant la protection du public et de l'environnement[89].

4.3 Colis de stockage

Pour être acceptés en stockage, les colis de déchets HA ou MAVL devront être conformes à des spécifications d'acceptation. La conformité des caractéristiques de chaque famille de colis sera vérifiée suivant un processus d'agrément. La conformité des colis fabriqués puis livrés sera suivie par des actions de surveillance de la qualité[90] et par des contrôles.

Des projets de spécifications d'acceptation seront joints à la demande d'autorisation de création du centre de stockage. Ces spécifications deviendront applicables lorsqu'elles auront pris en compte les prescriptions techniques d'exploitation établies par l'Autorité de sûreté nucléaire.

Les ordonnancements de mise en stockage des différentes familles de déchets, présentés dans la suite, ne préjugent pas de l'instruction de leur acceptabilité dans Cigéo.

En vue de leur stockage, tout ou partie des colis primaires décrits au chapitre 2 sont placés dans un « conteneur de stockage », formant ainsi des « colis de stockage ».

---

[89] Contrairement à un stockage, une installation d'entreposage n'est pas conçue pour pouvoir être fermée.
A l'issue de sa phase d'exploitation, les colis de déchets doivent impérativement en être retirés et, si nécessaire, reconditionnés, pour que la protection de l'homme et de l'environnement puisse continuer à être assurée. C'est ainsi qu'aujourd'hui les colis de déchets les plus anciens sont extraits de la première génération française d'entrepôts (par exemple les fosses et casemates de Marcoule, cf. Chapitre 3) pour être placés dans une deuxième génération (EIP à Marcoule…).

[90] Des actions de surveillance des productions sont d'ores et déjà menées en anticipation.

4.3.1 Déchets HA

Pour les déchets HA vitrifiés, le conteneur de stockage, ou « surconteneur », a pour fonction principale d'interdire l'arrivée d'eau au contact du verre pendant la période d'exploitation du stockage et au-delà, a minima pendant la période thermique.

En effet, la présence d'eau condensée dans les alvéoles de stockage, en provenance des argilites, ne peut être exclue à terme. Au contact du conteneur primaire en acier inoxydable, 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 existerait 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, préjudiciable à la réversibilité. La vitesse d'altération aqueuse du verre, liée à la dissolution de la silice, dépend de la température[91] : elle augmente d'un facteur 15 à 30 entre 50 °C et 90 °C. Pendant la période thermique, le relâchement de radionucléides en cas d'arrivée d'eau serait donc accéléré. De plus, les données physiques qui déterminent le comportement des radionucléides dissous en solution sont mieux connues à moins de 70 °C. A long terme, au-delà de la période thermique et après perte de l'étanchéité des conteneurs, le verre permet de limiter drastiquement le relâchement des radionucléides dans l'eau.

La solution de référence étudiée est un surconteneur constitué d'acier non allié épais, matériau simple et robuste au comportement maîtrisé. Chaque surconteneur est constitué d'un corps et d'un couvercle préfabriqués ; l'assemblage avec le colis primaire et la fermeture du surconteneur s'effectuent en cellule chaude. La fermeture s'effectue par soudage en pleine épaisseur. Des patins de céramique industrielle sont incorporés au surconteneur pour faciliter sa manutention en alvéole de stockage (Figure 4.3-1).

Le même type de conteneur de stockage est considéré pour les autres déchets HA, notamment les combustibles usés EL4.

Les dimensions extérieures des colis de stockage HA diffèrent selon les conteneurs primaires. Deux diamètres sont ainsi considérés, l'un correspondant typiquement aux CSD-V (famille F1-3-01), l'autre aux colis AVM (F1-4-01).

Il serait techniquement envisageable de procéder à la mise en conteneur de stockage sur les sites de La Hague, de Marcoule et de Cadarache. En effet des colis de stockage HA peuvent être transportés en emballages de « type B » entre ces sites et le site de Cigéo ([92]).

Cette option présente néanmoins des inconvénients par rapport à une mise en conteneur de stockage sur le site même de Cigéo. Des emballages de transport ont d'ores et déjà été développés pour l'expédition de colis primaires produits à La Hague[93]. Un transport de colis de stockage réduirait la capacité unitaire de chaque emballage, augmentant le nombre de transports.

---

[91] Pour les CSD-V (famille F1-3-01), la vitesse initiale de dissolution [V_0] lors de l'arrivée d'eau résulte d'un déséquilibre géochimique entre le verre et son environnement ; puis la saturation en silice de l'environnement du déchet se traduit par un ralentissement de la dissolution vers une vitesse résiduelle [V_R]. Entre 50 °C et 90 °C, la vitesse de dissolution initiale augmente d'un facteur 30, la vitesse résiduelle d'un facteur 15 environ.

[92] Les transports des déchets obéissent aux règles applicables à toutes les matières radioactives, qui constituent une sous-catégorie des matières dangereuses (« classe 7 »). Au plan international, leur réglementation relève de l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique). Le dernière révision date de 2003 et succède à une refonte complète, qui était applicable à partir de 2001(« Safety Requirements »). Dans ce cadre, les déchets HA sont transportés dans des emballages de transport de type B qui sont conçus pour résister à des conditions accidentelles sévères, simulées par des tests, validées par des agréments et contrôlées.

[93] Ces développements ont permis le retour de déchets étrangers vers leur pays d'origine.

Figure 4.3-1 *Colis de stockage pour déchets HA vitrifiés des familles F1-3-01 (CSD-V) et F1-3-02 (CSD-U), à gauche, et de la famille F1-5-01, à droite*

Figure 4.3-2 *Colis de stockage de combustibles usés EL4 (F1-5-02)*

4.3.2 Déchets MAVL

Le chapitre 2 montre que les déchets MAVL recouvrent une grande diversité de colis primaires (matériaux, géométries, modes de préhension). L'optimisation des méthodes de mise en stockage conduit à concevoir des colis de stockage standardisés, pouvant regrouper plusieurs colis primaires dans un conteneur en béton (Figure 4.3-4). Des démonstrateurs de tels conteneurs ont été réalisés. Certains ont fait l'objet d'essais (chute, vieillissement sous gerbage). Ils sont présentés au public à l'Espace technologique du Centre de Meuse/Haute-Marne (Figure 4.3-3).

Le Tableau 4.3-1 présente les hypothèses en matière de capacité des conteneurs de stockage, qui ont été utilisées lors de la phase d'études et de recherches 2007-2009. Des évolutions sont en cours d'étude, notamment en vue de diminuer les volumes et masses des colis manutentionnés dans l'installation souterraine. Pour certains colis primaires de grandes dimensions (notamment les familles F2-2-03, F2-3-07, F2-3-08), l'Andra étudie aussi l'alternative d'un stockage direct des colis primaires[94].

La forme parallélépipédique du conteneur de stockage permet de minimiser les vides résiduels dans les alvéoles de stockage tout en facilitant un éventuel retrait. A l'intérieur du colis de stockage, la conception en béton massif minimise les vides résiduels autour des colis primaires. Le choix du béton assure une intégrité mécanique sur une durée d'ordre séculaire au regard d'un éventuel retrait des colis.

[94] Cette alternative n'est pas prise en compte dans la suite du document.

Le conteneur de stockage n'est pas dimensionné pour assurer la protection des opérateurs vis-à-vis de l'exposition externe, car cela nécessiterait une épaisseur de béton supplémentaire contraire à la recherche de compacité du stockage. La protection vis-à-vis de l'exposition externe est reportée sur des écrans interposés entre le colis et les postes de travail.

Les dimensions et masses des colis de stockage sont fonction des colis primaires et des procédés de mise en alvéole.

Ces dimensions et masses, ainsi que le contenu radioactif des colis, déterminent la faisabilité et la classe d'un transport par rail ou route. Les colis de stockage MAVL les moins actifs pourraient relever de la catégorie de transport IP2, moins contraignante que le type B ; dans ce cas, l'augmentation de masse et de volume résultant de la mise en conteneur de stockage ne devrait pas pénaliser les conditions technico-économiques du transport. Les déchets MAVL plus actifs impliqueront en revanche des transports en emballages de type B.

- De manière générale, les colis de stockage les plus petits peuvent être transportés par route ou par rail : il s'agit notamment de fûts de boues bitumées ou encore de déchets de structure de Marcoule. Au plan technique, la mise en conteneur de stockage est donc envisageable sur le site de conditionnement des déchets ou sur le site de stockage.
- A l'opposé, des colis de stockage plus grands et plus actifs pourraient ne pas être transportables par route ou par rail. Ils devraient alors être assemblés nécessairement sur le site de stockage.
- Les colis de stockage correspondant à des colis primaires de grandes dimensions ne seraient éventuellement transportables sur route ou rail que dans le cas d'une activité et d'un débit de dose faibles.

Figure 4.3-4 Exemple de conteneur de stockage pour CSD-C (famille F2-3-02)

Figure 4.3-3 Démonstrateur de conteneur de stockage présenté au public à l'Espace technologique du Centre de Meuse/Haute-Marne

Tableau 4.3-1 Hypothèses de mise en conteneur de stockage des familles de déchets MAVL utilisées pour les études et recherches de 2007 à 2009

Famille		Volume d'un colis de stockage (m³)	Nombre de colis primaires par colis de stockage
Déchets MAVL conditionnés sur le site de La Hague			
Colis de coques et embouts cimentés en fûts métalliques de 1 500 l (déchets de structure)	F2-3-01	8,65	2
Colis de déchets compactés CSD-C (déchets de structure et technologiques)	F2-3-02 ([95])	3,66	4
		5,82	8
Colis d'enrobés bitumineux produits à partir d'effluents traités dans STE3, en fûts inox de 220 l (boues bitumées)	F2-3-04	7,86	9
Boues STE2 conditionnés dans une matrice bitumineuse, en fût inox 220 l (boues bitumées)	F2-3-05	7,86	9
Colis de déchets solides d'exploitation, cimentés en conteneurs amiante ciment CAC (déchets technologiques)	F2-3-07	6,95	2
Colis de déchets solides d'exploitation cimentés, en conteneurs béton-fibres CBFC'2 (déchets technologiques)	F2-3-08		
Déchets technologiques contaminés en émetteurs alpha, prévus d'être compactés et placés en conteneurs inox	F2-3-10	6,14	6
Effluents de rinçage vitrifiés en conteneurs inox (CSD-B)	F2-3-11	3,66	4
Boues de STE2séchées et compactées	F2-3-12	6,14	6
Déchets pulvérulents cimentés en fûts inox dits « ECE »	F2-3-13	8,65	2
Déchets MAVL conditionnés sur le site de Marcoule			
Colis d'enrobés bitumineux (STEL) produits depuis octobre 1996, en fûts inox (boues bitumées)	F2-4-03	4,21	4
Fûts d'enrobés bitumineux (STEL) produits avant octobre 1996, reconditionnés en fûts inox de 380 l (boues bitumées)	F2-4-04	8,17	6
Fûts d'enrobés bitumineux (STEL) produits avant octobre 1996, retirés des casemates à partir de 2017		4,21	4
Colis de déchets solides d'exploitation de l'AVM, en conteneur inox (déchets technologiques)	F2-4-05	6,14	6
Déchets de structure métalliques en fûts inox de 380 l	F2-4-07	7,83	4

[95] Dans la phase d'études et recherches 2007-2009, une famille notée F2-3-03 était individualisée, avec les mêmes hypothèses en matière de colis de stockage. Dans l'IN 2012, cette famille a été remplacée par la famille F9-3-01.

Famille		Volume d'un colis de stockage (m³)	Nombre de colis primaires par colis de stockage
Déchets de structure magnésiens en fûts inox de 223 l	F2-4-09	6,53	6
Déchets de procédé pulvérulents en fûts inox de 380 l	F2-4-10	8,17	6
Déchets technologiques métalliques (et organiques) d'exploitation et de démantèlement, en fûts inox de 380 l	F2-4-11	8,17	6
Déchets du cœur du réacteur Phénix	F2-4-12	6,14	6
Effluents de rinçage des cuves de solutions de produits de fission de Marcoule, vitrifiés en conteneurs inox	F2-4-13	6,14	4
Déchets de structure et de démantèlement de l'APM	F2-4-14	6,14	6
Aiguilles de barres de commande	F2-4-15	6,14	4
Déchets MAVL conditionnés sur le site de Cadarache			
Colis de sulfates de plomb radifères	F2-5-01	7,83	4
Colis de boues de filtration cimentées en coques béton[96] de 500 l	F2-5-02	7,83	4
		6,53	6
Fût de 700 litres de concentrats d'évaporation cimentés reconditionnés en conteneur métallique de 1070 l	F2-5-03	14,72	2
Colis de déchets solides d'exploitation cimentés, faiblement irradiants, en fûts métalliques de 870 l	F2-5-04	6,13	2
Colis de déchets solides d'exploitation moyennement irradiants en fûts acier de 500 l (déchets technologiques)	F2-5-05	6,95	4
Coques béton (1 800 ou 1 000 litres) de déchets solides cimentés (ciment ou ciment-bitume)	F2-5-06	10,62	1
Colis « blocs sources » cimentés en conteneurs béton / acier	F2-9-01	14,72	2
Déchets MAVL conditionnés sur le site de Valduc			
Boues et concentrats cimentés, en fûts métalliques	F2-6-02	6,53	6
Effluents radioactifs provenant du recyclage de Pu, vitrifiés	F2-6-03	3,66	4
Déchets MAVL d'exploitation et de déconstruction des réacteurs électronucléaires (EDF)			
Déchets activés des réacteurs EDF hors déchets sodés, en conteneurs C1PG	F2-2-03 [97]	6,58	1

[96] Pour les colis autorisant un enlèvement de la coque béton d'entreposage avant mise en conteneur de stockage, le volume unitaire du colis primaire est de 0,22 litre.

[97] Dans la phase d'études et recherches 2007-2009, une famille notée F2-2-02 était individualisée, avec les mêmes hypothèses en matière de colis de stockage. Dans l'IN 2012, les déchets de cette famille ont été intégrés à la famille F2-4-15.

4.4 Architecture de stockage

Une installation souterraine de stockage est constituée d'alvéoles (des cavités souterraines) creusés dans la formation d'argilites, et recevant les colis de stockage.

La conception d'ensemble de l'installation souterraine, et l'implantation des alvéoles proches du milieu de la couche argileuse, favorisent les fonctions de sûreté du stockage vis-à-vis du transfert des radionucléides par voie aqueuse.

Pour la construction des ouvrages souterrains, la mise en stockage des déchets, et la gestion des installations jusqu'à leur fermeture, l'accès s'effectue par des puits verticaux et des descenderies entre la surface et le niveau de stockage, puis par des galeries de liaison jusqu'aux alvéoles de stockage. La localisation de ces ouvrages est aussi définie pour favoriser les fonctions de sûreté à long terme, principalement la limitation de la circulation d'eau.

L'architecture d'ensemble est évolutive : les premiers ouvrages d'accès et les premières tranches de stockage ne figent pas les solutions et moyens techniques qui pourront être mis en œuvre pour les tranches suivantes, permettant de bénéficier du retour d'expérience et des progrès technologiques.

Lorsqu'il est décidé de fermer des alvéoles, des modules puis des zones de stockage, les galeries d'accès et de liaison sont intégralement remblayées pour limiter les déformations mécaniques à long terme autour des galeries, lorsque leur revêtement aura perdu son intégrité mécanique.

Des scellements de faible perméabilité sont implantés de part en part dans les galeries puis dans les liaisons surface-fond pour limiter la circulation d'eau.

Pendant l'exploitation du stockage, des installations en surface assurent la gestion des colis de déchets avant leur transfert vers les installations souterraines de stockage ; elles assurent aussi le soutien des opérations souterraines. Ces installations sont conçues pour pouvoir être démantelées quand le choix en sera fait.

4.4.1 Alvéoles de stockage des déchets HA

La conception des alvéoles de stockage des déchets HA 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, à l'échelle de l'alvéole et à celle du stockage.

Les alvéoles de stockage des déchets HA sont des forages ou microtunnels horizontaux borgnes, d'environ 0,7 mètre de diamètre excavé. Ils sont revêtus d'un chemisage métallique qui soutient les argilites : il permet la manutention des colis tant pour leur mise en place que leur récupération éventuelle.

Les colis de stockage sont descendus dans les installations souterraines et transférés au droit des alvéoles au moyen d'une « hotte » récupérable assurant la protection vis-à-vis de l'exposition externe, afin de maintenir l'ensemble des galeries accessibles aux opérateurs. Chaque colis est extrait de la hotte à l'entrée de l'alvéole puis est poussé jusqu'à son emplacement de stockage (Figure 4.4-1). Un retrait de colis s'effectue par inversion de ce processus.

Les colis caractérisés par une puissance thermique modérée peuvent être stockés côte à côte, c'est le cas des colis AVM ou CSD-U. L'emprise souterraine de stockage de ces colis ne dépend pas de la durée d'entreposage préalable ; elle est très limitée.

Pour les déchets HA fortement exothermiques (famille F1-3-01), l'espacement des colis à l'intérieur d'un alvéole (au moyen d' « intercalaires ») et l'espacement des alvéoles constituent les paramètres d'adaptation de l'architecture du stockage à la puissance thermique des déchets à la mise en stockage.

Le respect des critères de température du stockage impose que la radioactivité ait suffisamment décru. Il n'est donc pas possible de stocker des déchets HA fortement exothermiques dans le domaine A de la Figure 4.4-2 (page 120), couvrant les 45 premières années d'un CSD-V après sa fabrication.

Au-delà de cette durée minimale de décroissance en entreposage, l'emprise et le volume excavé pour stocker un colis (comprenant les volumes liés à l'alvéole et à sa galerie d'accès) diminuent en fonction de l'âge des colis à la mise en stockage.

La Figure 4.4-2 distingue deux domaines : 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.

Le domaine C a été retenu comme domaine de dimensionnement du stockage.

Le début du domaine correspond à un stockage « au plus tôt », après une durée d'entreposage de 60 ans. Une décision d'augmenter la durée d'entreposage (entre 60 et une centaine d'années) se traduira par la diminution voire la suppression des intercalaires entre colis dans le même alvéole (comme dans le cas des colis AVM ou CSD-U), et par un rapprochement des alvéoles. Au-delà d'une centaine d'années environ, le volume excavé et l'emprise du stockage ne diminuent quasiment plus avec la durée d'entreposage. Cela est dû à la part progressivement prépondérante de l'américium 241.

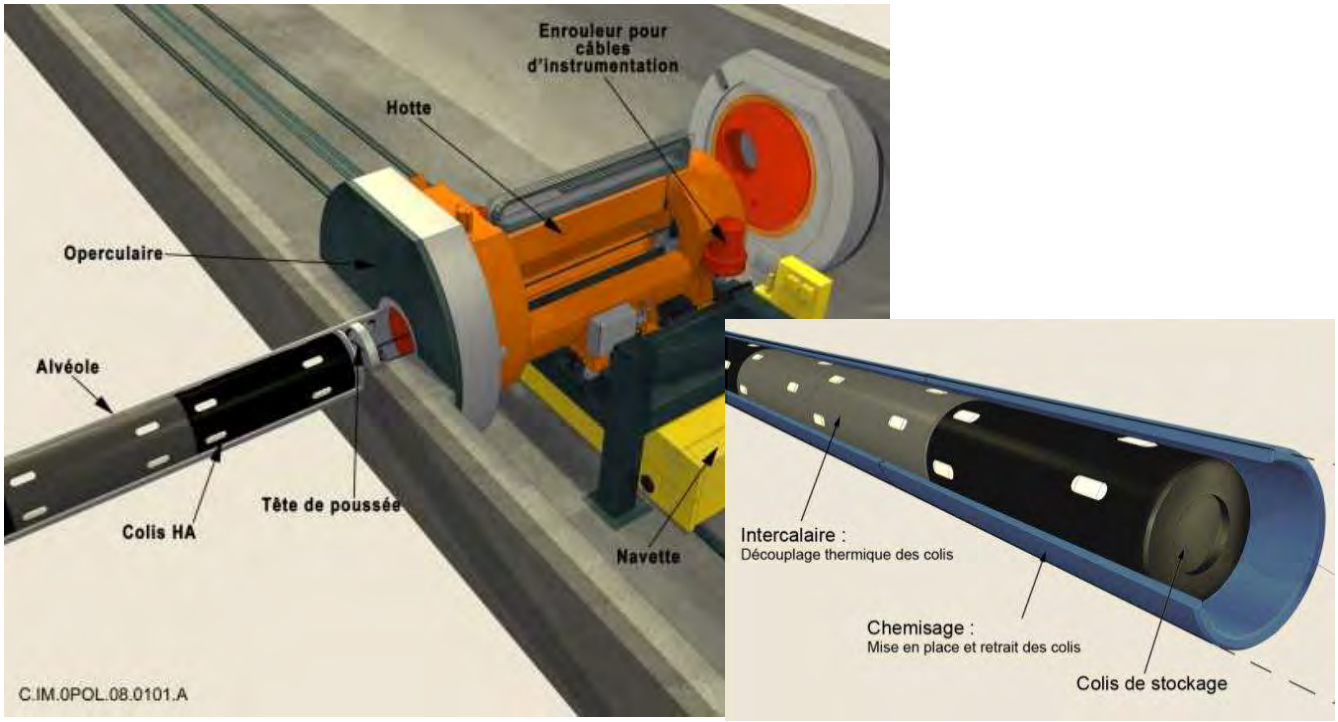


Figure 4.4-1 Alvéole de stockage de déchets HA (à gauche, équipements de mise en alvéole)

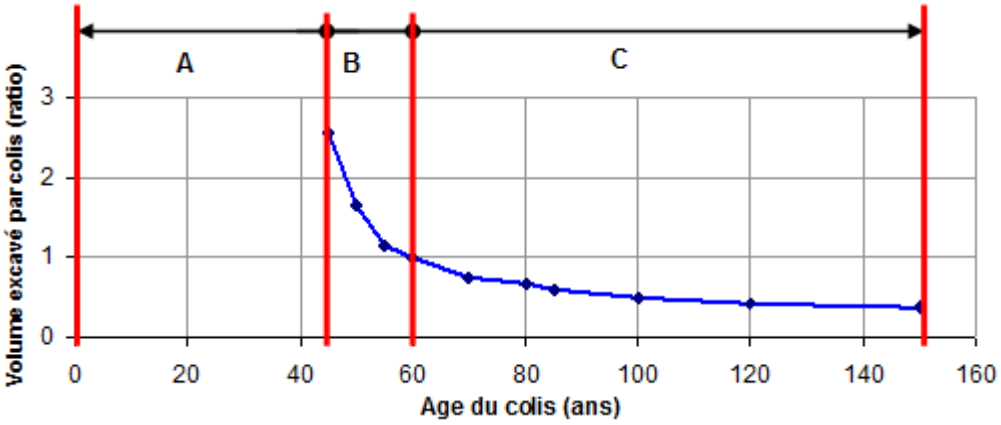


Figure 4.4-2 Influence de la durée d'entreposage sur le volume excavé par CSD-V [ratio par rapport à une durée d'entreposage de 60 ans]

4.4.2 Alvéoles de stockage des déchets MAVL

Les alvéoles de stockage de déchets MAVL sont des tunnels horizontaux de longueur limitée à quelques centaines de mètres. Le diamètre excavé des alvéoles est essentiellement le résultat de l'analyse géotechnique et de la recherche de compacité.

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 contribue aussi aux fonctions de sûreté à long terme du stockage grâce à ses propriétés physico-chimiques (limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser au plus près des déchets). Sa section intérieure est de forme rectangulaire et délimite une chambre dans laquelle les colis de stockage sont empilés. Les jeux entre colis de stockage sont minimisés, ce qui facilite les opérations de fermeture.

Les colis MAVL sont non ou faiblement exothermiques. Pour les colis faiblement exothermiques, une température maximale de 70 °C dans l'alvéole est considérée. Pour les colis CSD-C de la famille F2-3-02 contenant des déchets de structure REP UOX ou MOX, une phase d'entreposage avant stockage permet de diminuer l'activité du cobalt 60 et de faciliter ainsi la gestion en stockage du dégagement thermique ainsi que de l'irradiation gamma.

Certains déchets MAVL contiennent des radionucléides fissiles. L'agencement géométrique des colis primaires garantit le maintien d'une géométrie sous critique.

La chambre de stockage constitue un volume irradiant dans lequel les colis sont manutentionnés par un équipement télé-opéré. La tête des alvéoles est équipée d'un sas de radioprotection permettant l'extraction des colis de stockage contenus dans les hottes qui les ont amenés depuis la surface, et la protection radiologique des opérateurs susceptibles d'intervenir dans la galerie d'accès (Figure 4.4-3). Comme pour les déchets HA, le système de manutention pour la mise en alvéole peut être inversé et utilisé pour retirer les colis stockés.

Aussi longtemps qu'un alvéole n'est pas fermé, une ventilation y est maintenue, via les jeux entre colis de stockage. Un objectif est d'évacuer l'hydrogène de radiolyse généré par certains déchets MAVL (cf. chapitre 2). Par ailleurs, la ventilation maintient une faible hygrométrie dans l'alvéole favorisant la durabilité des conteneurs (primaires et de stockage) et du revêtement.

Chaque alvéole ne peut recevoir qu'un nombre limité de familles de colis, voire une seule famille. En particulier des colis contenant en quantités significatives des matières organiques ne seront pas stockés dans les mêmes alvéoles que des colis n'en contenant pas.

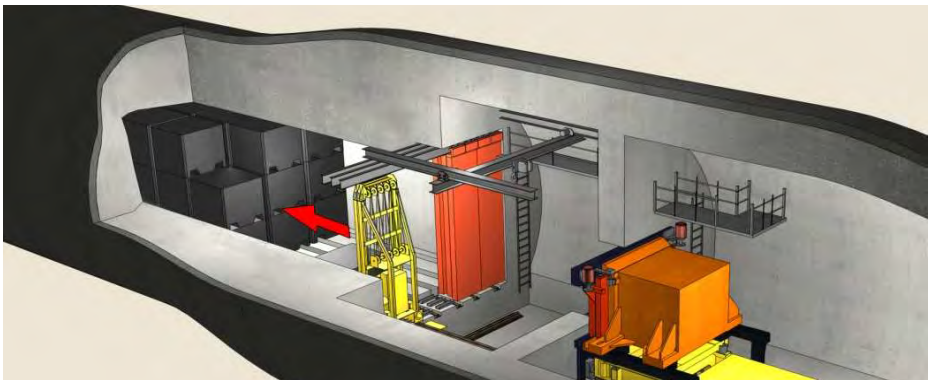


Figure 4.4-3 Principe de mise en alvéole des colis MAVL

4.4.3 Installations de surface

Au plan industriel, les installations de surface comprennent un terminal ferroviaire et/ou routier pour le transport des colis de déchets, des ateliers nucléaires, des usines de ventilation de l'installation souterraine, des moyens de gestion des déblais et diverses installations de soutien aux chantiers souterrains et aux opérations nucléaires.

Des ateliers nucléaires réaliseront le contrôle et le déchargement des emballages de transport utilisés pour amener des colis depuis les sites de production, ainsi que le chargement/déchargement des hottes pour le transfert des colis de stockage entre la surface et les installations souterraines. Seuls des colis ne présentant pas de contamination surfacique externe labile ni de risque de mise en suspension de particules radioactives seront pris en charge. Ces ateliers ou des ateliers dédiés réaliseront aussi des fonctions de contrôle des colis et d'assemblage des colis de stockage, selon la répartition de ces activités entre les sites de production et le site de stockage (cette répartition pourra être spécifique à chaque famille). Tous les ateliers nucléaires du centre de stockage seront reliés entre eux, ainsi qu'aux ouvrages de liaison surface-fond dans lesquels s'effectuent les transferts des colis. Certaines fonctionnalités seront nécessaires dès la mise en exploitation du centre de stockage, les ateliers correspondants seront alors construits avant 2025. D'autres pourront être mis en place ultérieurement, au fur et à mesure des décisions en matière de gestion des déchets. Aussi l'architecture sera modulaire et adaptative, préservant la possibilité d'adjoindre des ateliers supplémentaires et de modifier ou déconstruire certains ateliers tout en poursuivant l'exploitation des autres.

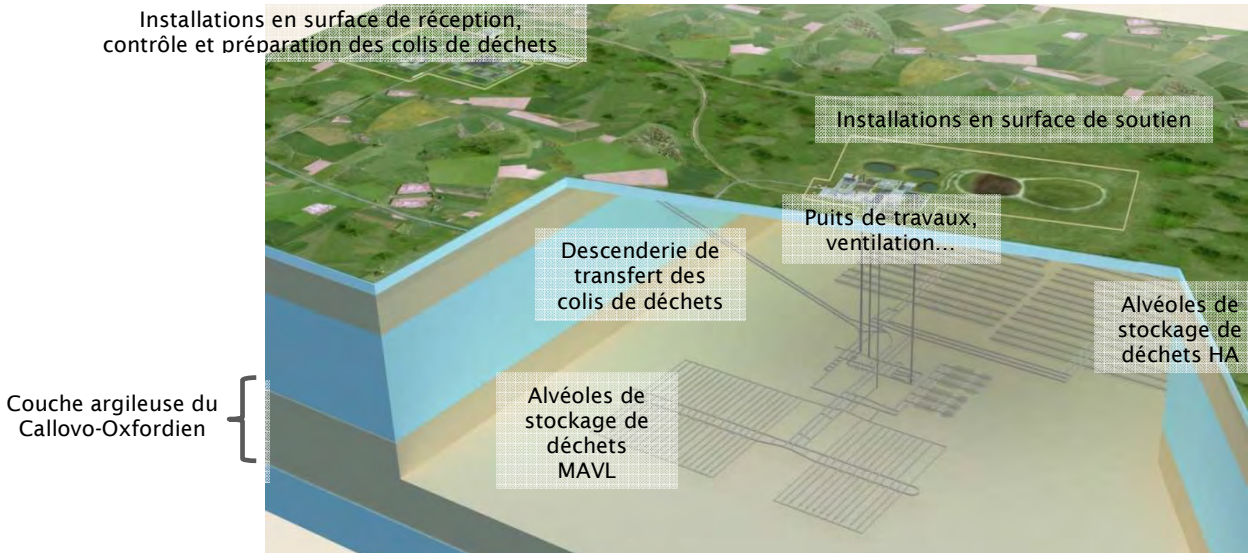


Figure 4.4-4 Schéma de principe des installations de surface et souterraine

4.5 Première esquisse de chronique de stockage présentée en 2009, simulations exploratoires

En 2009, l'Andra a simulé à titre exploratoire des scénarios possibles de mise en stockage des déchets HA et MAVL pour illustrer le rôle complémentaire que peut jouer l'entreposage. Cette section en présente les principaux éléments. Il s'agit ici d'illustrer la méthode proposée pour étudier et optimiser le système de gestion des déchets associant entreposage et stockage. Les résultats de l'exercice ne préjugent pas des travaux menés depuis par les producteurs de déchets et l'Andra (section 4.6).

Dans cet exercice fondé sur l'IN 2009, l'investissement déjà réalisé pour créer les capacités d'entreposage existantes était valorisé en cherchant à utiliser ces capacités jusqu'à la date de leur cessation définitive d'exploitation annoncée dans l'IN 2009. Le caractère conventionnel de la date de 2040 considérée alors pour les entrepôts de La Hague rendait l'exercice particulièrement conservatif.

Le renouvellement d'un entreposage représente un investissement généralement important. Le retrait des colis de déchets hors d'un entreposage en cessation définitive d'exploitation pour les placer dans une nouvelle installation peut avoir un impact en termes de dosimétrie des travailleurs. Aussi, sous réserve de la disponibilité des installations de stockage et de l'acceptabilité des différents types de colis, une voie d'optimisation de la gestion des déchets conditionnés consiste à mettre progressivement les colis de déchets en stockage à partir de la cessation définitive d'exploitation de l'installation d'entreposage qui les accueille. Ainsi les colis de déchets entreposés dans des installations mises en service dans les deux dernières décennies avec pour certaines d'entre elles des durées prévisionnelles d'exploitation supérieures à 50 ans étaient supposés laissés en attente et stockés après 2040.

Par ailleurs, une mise en stockage anticipée est envisageable lorsque les capacités d'entreposage ainsi libérées sont utilisées pour accueillir d'autres colis qui ne pourraient pas être stockés immédiatement, ou pour mieux utiliser dans la durée la capacité opérationnelle du centre de stockage.

L'esquisse de chronique de stockage présentée en 2009 reposait sur une hypothèse de mise en stockage des colis de manière continue dans la durée. En effet la configuration du centre étudiée permet d'y réaliser simultanément les opérations de mise en stockage de colis et la construction de nouveaux modules de stockage. Cette co-activité est gérée par une séparation physique des deux types d'activités, la zone en exploitation nucléaire étant progressivement étendue avec l'avancée des travaux.

Sur la base d'une utilisation maximale des diverses capacités d'entreposage existantes, l'esquisse de chronique de mise en stockage présentée en 2009 montrait qu'il est possible de planifier une augmentation progressive du flux traité par les installations de stockage (jusqu'à cinq à six colis de stockage en moyenne par jour avec les hypothèses sur les colis de stockage données au Tableau 4.3-1).

La Figure 4.5-1 présente une simulation du flux moyen de colis de stockage[98] avec une hypothèse de mise en stockage dès 2050 des déchets HA fortement exothermiques (famille F1-3-01). Les courbes en traits pleins illustrent la mise en stockage des colis de déchets produits avant 2030, les courbes en traits pointillés y ajoutent les colis des familles F2-3-02 et F1-3-01 produits au-delà. Elles ne prennent pas en compte les futurs déchets de démantèlement[99] estimés dans l'IN 2009 à 9 750 m^3 sous forme non conditionnée.

[98] Les simulations présentées en 2009 se fondaient sur l'hypothèse d'un colis primaire AVM par colis de stockage. L'Andra étudie actuellement la possibilité de placer deux colis primaires par colis de stockage.

[99] Les figures ne rendent pas compte non plus des déchets d'exploitation des installations au-delà de 2030, mais ceux-ci représentent des volumes engagés peu significatifs.

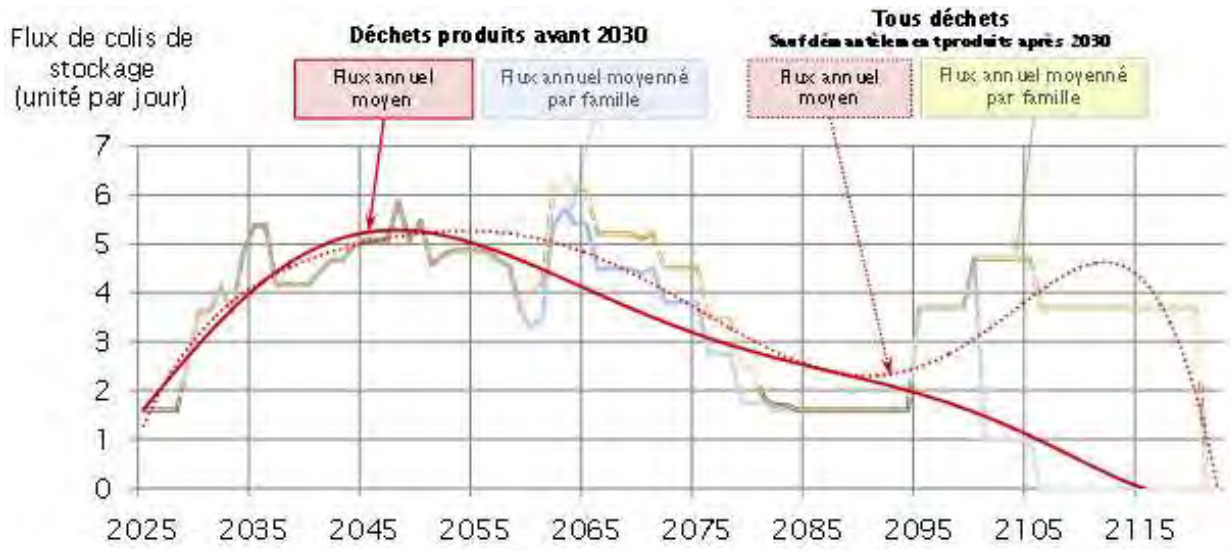


Figure 4.5-1 *Simulation[100] exploratoire du flux journalier de la mise en alvéole des colis de stockage des déchets HA et MAVL, pour une mise en stockage des déchets HA fortement exothermiques au plus tôt (en nombre de colis de stockage par jour) [2009]*

La Figure 4.5-2 traduit ces flux en volumes de colis de stockage. La Figure 4.5-3 présente les flux de colis de stockage dans l'hypothèse d'un début de mise en stockage des déchets HA fortement exothermiques à partir de 2087, avec une durée d'entreposage préalable de 92 à 100 ans.

On notera la possibilité d'augmenter le flux de colis entre 2050 et 2060 sans modifier la capacité opérationnelle du centre, ce qui faciliterait la mise en stockage des déchets de démantèlement non pris en compte ici.

Il est aussi à noter que le pic de volume d'activité entre 2035 et 2050 est corrélé aux hypothèses prises pour la cessation définitive d'exploitation (CDE) de EDS et des bâtiments S et ES à La Hague. Des études paramétriques (voir infra, section 4.5.3) ont montré que d'autres hypothèses ouvrent la possibilité d'un lissage de l'activité dans le temps.

La prise en compte des déchets de démantèlement, ainsi que la possibilité d'allonger la durée d'exploitation de réacteurs électronucléaires devraient réduire les baisses d'activité observées sur les figures d'abord à l'horizon 2050, puis à l'horizon 2075 (la durée d'exploitation des réacteurs électronucléaires considérée dans les simulations présentées ici était de 40 années).

En résorbant progressivement les volumes de colis MAVL accumulés depuis le début de production, le scénario simulé ici fait passer le temps d'attente avant stockage des plus anciens colis MAVL de soixante ans à l'horizon 2025 (pour un colis fabriqué dans les années 1960) à une trentaine d'années après 35 à 40 ans d'exploitation du stockage.

[100] La simulation présentée par la Figure 4.5-1 et par la Figure 4.5-2 repose sur l'hypothèse d'une mise en stockage des déchets HA fortement exothermiques de la famille F1-3-01 dès 2050. Elle adopte aussi l'hypothèse d'une mise à l'arrêt définitif de ECC en 2060.

Avec les chroniques esquissées, un seul type d'alvéole MAVL serait à mettre à disposition à la mise en exploitation du centre. Le nombre de types différents d'alvéoles MAVL exploités simultanément augmenterait ensuite progressivement. En utilisant au mieux les capacités d'entreposage existantes, il apparaît possible de limiter ce nombre à quatre (Figure 4.5-4). La possibilité de limiter le nombre d'alvéoles MAVL exploités simultanément constitue une piste potentielle de simplification des conditions d'exploitation du stockage.

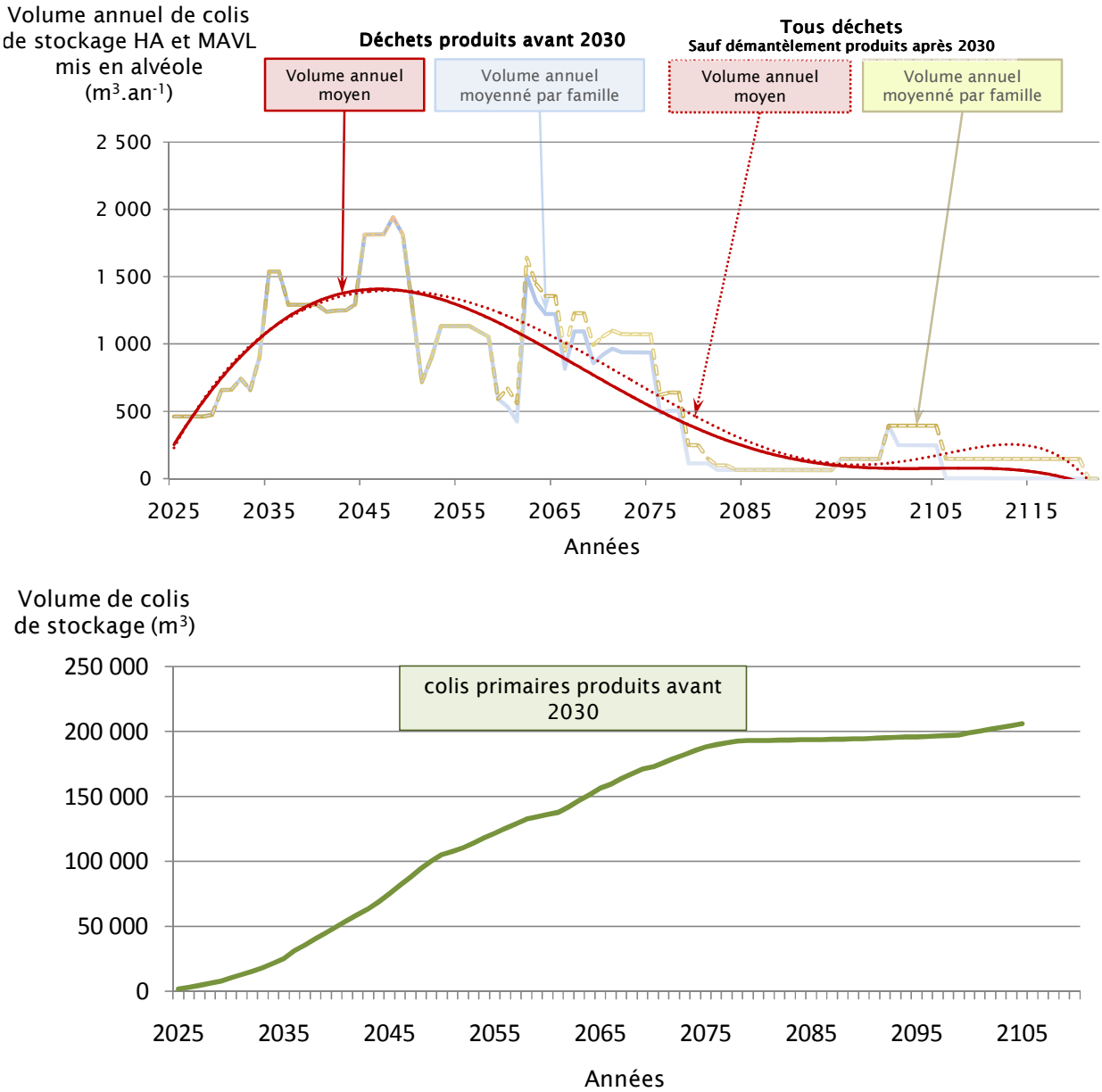


Figure 4.5-2 *Simulation[100] exploratoire des volumes de colis de stockage des déchets HA et MAVL mis en alvéole : en haut, volume mis en alvéole chaque année ; en bas, volume cumulé [2009]*

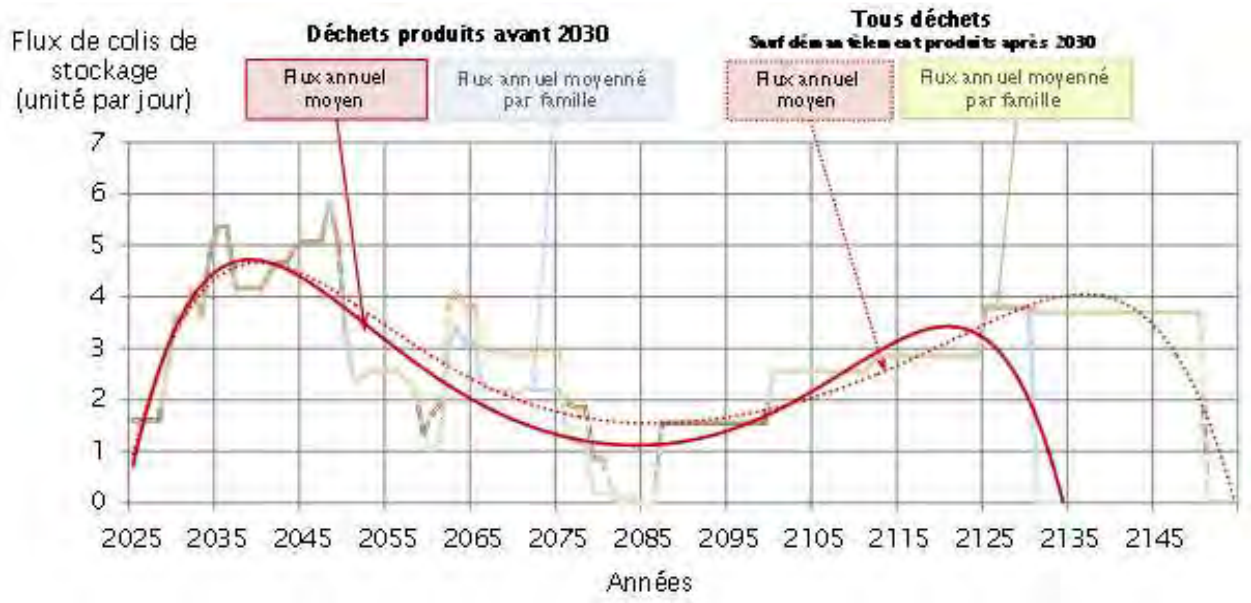


Figure 4.5-3 *Simulation exploratoire du flux de mise en alvéole des colis de stockage, pour une mise en stockage des déchets HA fortement exothermiques à un âge de 92 à 100 ans [2009]*

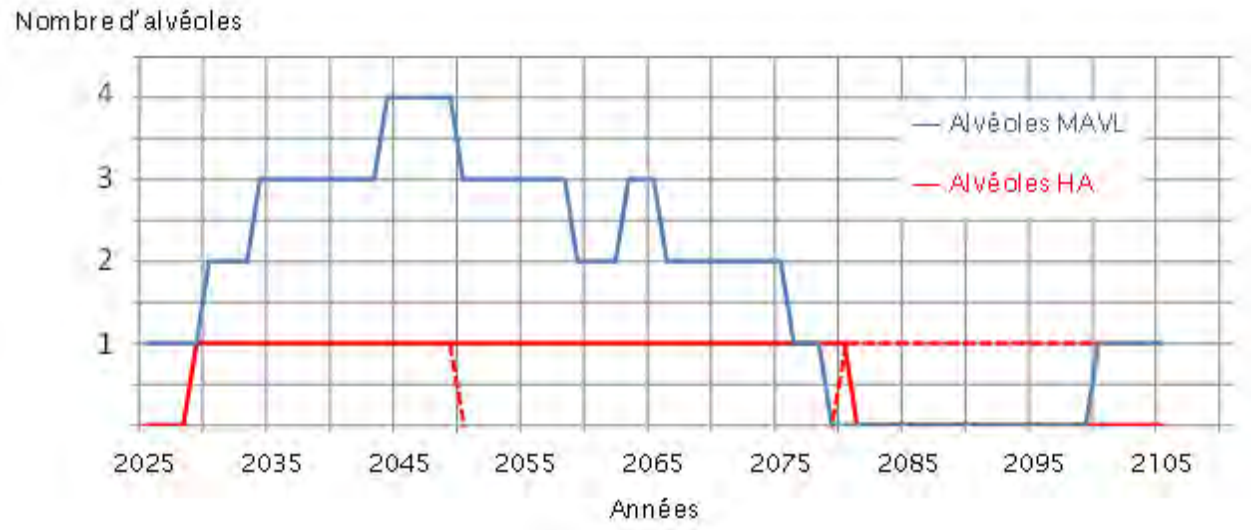


Figure 4.5-4 *Simulation exploratoire du nombre de types différents d'alvéoles de stockage[101] exploités simultanément pour accueillir les déchets HA et MAVL produits jusqu'en 2030 [2009]*

[101] La figure ne rend pas compte d'une éventuelle exploitation simultanée de deux alvéoles différents pour la famille F2-3-02, correspondant aux deux types de colis de stockage envisagés au Tableau 4.3-1.

4.5.1 Scénario exploratoire de stockage des colis HA (2009)

Le dégagement thermique modéré des déchets HA de Marcoule et l'ancienneté des installations d'entreposage actuelles (bâtiment 213 de l'APM et AVM/SVM, cf. chapitre 3) justifient une mise en stockage avant les déchets HA de La Hague. On pourra chercher à stocker les déchets vitrifiés PIVER (famille F1-5-01) aussi tôt que la mise en exploitation du centre de stockage le permettra[102]. Un flux de mise en alvéole égal à un colis de stockage par jour correspondrait à une durée de mise en stockage de moins d'une année. Une mise en stockage des colis AVM sur onze années conduirait à un flux de 300 colis par an, soit 50 $m^3.an^{-1}$ en volume de colis primaires (Figure 4.5 5).

Parallèlement, ou après la mise en stockage des déchets vitrifiés de Marcoule, celle des colis CSD-U de la famille F1-3-02 permettrait de diminuer les besoins en entreposage (Figure 4.5-5).

L'hypothèse d'un désentreposage de cette famille sur sept à huit années, adoptée dans l'exercice présenté en 2009, conduirait à un flux de mise en stockage d'environ 20 $m^3.an^{-1}$ (115 colis par an).

La durée prévisionnelle d'exploitation de l'installation Cascad à Cadarache (cf. chapitre 3) peut suggérer une mise en stockage des combustibles usés qui y sont entreposés dans la décennie 2040-2050 (alternativement on pourra chercher à libérer plus tôt des emplacements d'entreposage pour y accueillir de nouveaux combustibles dans l'attente d'un traitement).

Le stockage des premiers CSD-V fortement exothermiques est techniquement envisageable à partir de 2050. Le choix entre une mise en stockage au plus tôt ou une poursuite de la décroissance en entreposage renvoie à la possibilité de diminuer la consommation de ressource de stockage. Outre les conséquences sur le stockage, ce choix devra considérer les possibilités de prolongation de l'exploitation des entrepôts actuels R7, T7 et EV-SE et les besoins éventuels en capacités d'entreposage supplémentaires (cf. chapitre 5). L'étude exploratoire présentée en 2009 indiquait que ce choix devrait être effectué d'ici à 2030.

Pendant les deux premières décennies à partir du début de mise en stockage, le flux moyen de colis CSD-V a été estimé dans le cadre de l'exercice présenté en 2009 à environ 85 $m^3.an^{-1}$ (485 à 490 colis), le flux de mise en stockage augmentant à terme.

Avec les hypothèses de l'IN 2009, le dernier colis HA serait mis en stockage à l'horizon 2120 pour la durée d'entreposage minimale de 60 à 70 ans, soit presque un siècle après la mise en exploitation du centre. Avec une durée d'entreposage de 100 ans, la dernière mise en stockage de colis HA interviendrait à l'horizon 2150.

[102] De manière alternative un rapprochement avec la famille F1-3-02 (voir infra) pourrait simplifier les conditions d'exploitation du stockage si les conteneurs de stockage de déchets PIVER sont d'un diamètre identique à ceux des CSD-V.

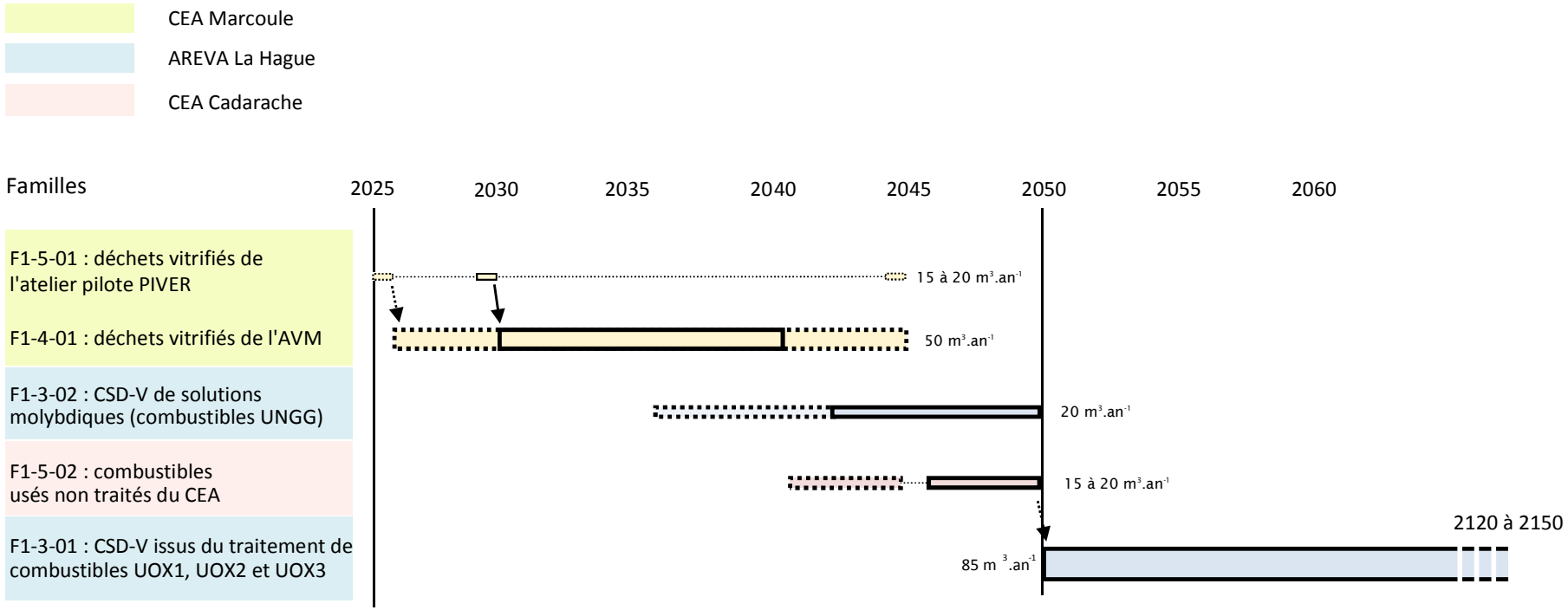


Figure 4.5-5 Simulation exploratoire de chroniques de mise en stockage de colis de déchets HA [2009]

4.5.2 Scénario exploratoire de stockage des colis MAVL (2009)

On présente dans la suite les motivations qui avaient été considérées dans la première esquisse de mise en stockage présentée en 2009, en matière d'ordonnancement colis de déchets MAVL. Sans préjuger des choix industriels, il s'agit ici d'illustrer la méthode qui pourra être mise en œuvre pour rechercher une optimisation d'ensemble du système de gestion des déchets.

4.5.2.1 Mise en stockage de résidus d'effluents liquides anciens de Marcoule (familles F2-4-03 et F2-4-04)

Les fûts de boues bitumées MAVL de Marcoule produits avant 1996, qui seront repris entre 2017 et 2035 des casemates 1 à 13 de la zone sud et reconditionnés, nécessiteront la création de nouvelles capacités d'entreposage (famille F2-4-04). Leur stockage dès la mise en exploitation du centre réduirait ces besoins en entreposage. Dans le cadre de l'exercice de simulation présenté en 2009, il avait été estimé qu'un flux moyen de 460 mètres cubes par an environ pendant dix ans permettrait à la fois d'absorber en ligne la reprise des anciens fûts et de dés-entreposer les colis accumulés entre 2017 et 2025 (Figure 4.5-6). Un maintien en entreposage des colis accumulés entre 2017 et 2025 réduirait le flux et décalerait dans le temps leur mise en stockage.

L'ordonnancement de la mise en stockage pourra être ajusté au déroulement des étapes d'autorisation de l'exploitation du stockage.

Les fûts de boues bitumées produits par la STEL de Marcoule après 1996 et jusqu'en 2014 (famille F2-4-03, volume : 518 m^3) pourraient être mis en stockage dans la continuité, préparant la mise à l'arrêt définitif de la casemate 14 après une quarantaine d'années d'exploitation. Un désentreposage en deux années correspondrait à un flux de 250 $m^3.an^{-1}$ environ.

4.5.2.2 Mise en stockage de déchets de structure et technologiques compactés de La Hague (famille F2-3-02[103])

Un début de mise en stockage des déchets de structure et technologiques compactés (CSD-C) dès la première décennie d'exploitation du centre permettrait de stabiliser le volume de colis entreposés. La mise en stockage se poursuivrait alors régulièrement au fur et à mesure de la production. Une exploitation des installations d'entreposage privilégiant l'expédition des colis les plus anciens de déchets de structure serait appropriée. Avec un âge de 20 à 30 ans lors du désentreposage, la puissance thermique et le débit de dose de ces colis auraient significativement décru, facilitant les conditions de stockage.

Un flux moyen de 200 $m^3.an^{-1}$ (soit environ 1 090 colis primaires par an) permettrait de mettre ECC à l'arrêt définitif en 2050, sans utiliser d'autre capacité d'entreposage pour gérer les colis extraits de ECC. Un décalage de la mise à l'arrêt de ECC de 2050 à 2060 permettrait de diminuer sensiblement le flux dans la période 2030-2050 (environ 150 $m^3.an^{-1}$, soit 820 colis primaires par an). On a retenu cette hypothèse dans les simulations exploratoires présentées en 2009.

Une interruption temporaire du flux pourrait faciliter la gestion d'autres entrepôts ou celle du stockage. A titre d'illustration, en maintenant les mêmes chroniques de mise en stockage pour les autres familles de colis, une interruption de flux de cinq années ramènerait à trois le nombre maximal d'alvéoles MAVL en exploitation simultanée à la Figure 4.5-4. Cependant, une telle option accroîtrait le flux de colis de déchets compactés pendant le reste de la période, jusqu'à 230 ou 240 $m^3.an^{-1}$, ou bien augmenterait les besoins en nouvelles capacités d'entreposage pour cette famille.

[103] L'IN 2009 individualisait la famille F2-3-03, qui ne figure plus dans l'IN 2012.

En tout état de cause, d'autres scénarios de mise en stockage des CSD-C peuvent être étudiés sur la base de campagnes associées à des flux plus élevés, à l'instar des autres familles de colis MAVL.

4.5.2.3 Mise en stockage de déchets de structure, technologiques et pulvérulents cimentés, et de résidus d'effluents de La Hague (familles F2-3-01, F2-3-04, F2-3-05, F2-3-07, F2-3-08, F2-3-13, F2-3-12)

Dans une hypothèse de CDE des entrepôts de déchets solides (EDS) et des bâtiments S et ES à la Hague vers 2040, la mise en stockage des colis de déchets qu'ils contiennent devrait être envisagée à cet horizon. Le volume important de ces colis de déchets 2030 (19 339 m^3) explique le pic d'activité en volume de colis de stockage observé à la Figure 4.5-2 sur la période 2035 à 2050.

Dans l'exercice de simulation présenté en 2009, il avait été considéré que des colis de résidus d'effluents liquides de La Hague seraient stockés dès la fin du stockage des familles 2-4-04 et 2-4-03 de Marcoule. La Figure 4.5-6 illustre le stockage dans un premier temps de familles de boues bitumées déjà produites, en tout (famille 2-3-05) ou partie (famille F2-3-04). Un flux de 580 $m^3.an^{-1}$ conduirait à un désentreposage des colis de boues bitumées en cinq années et demie environ. La mise en stockage des futurs colis de la famille F2-3-12 pourrait s'effectuer dans la continuité, jusqu'à la mise à l'arrêt définitif des bâtiments S et ES. Un flux de 530 $m^3.an^{-1}$ environ conduirait à un désentreposage en une dizaine d'années. Une interversion du stockage de ces familles de résidus d'effluents liquides serait aussi envisageable.

Les déchets des familles F2-3-07 et F2-3-08 entreposés dans les installations EDS pourront être mis en stockage en parallèle aux résidus d'effluents liquides. Un flux[104] de l'ordre de 530 $m^3.an^{-1}$ permettrait un désentreposage progressif sur une quinzaine d'années.

Les familles 2-3-13 et 2-3-01, également entreposées à EDS et potentiellement stockées dans les mêmes alvéoles, seraient aussi mises en stockage avant la mise à l'arrêt définitif d'EDS. A titre d'exemple, un flux d'environ 600 $m^3.an^{-1}$ (400 colis primaires par an) permettrait un désentreposage en cinq années.

4.5.2.4 Mise en stockage de déchets de l'Atelier de vitrification de Marcoule (famille F2-4-05) et des déchets MAVL vitrifiés (familles F2-4-13, F2-3-11 et F2-6-03)

Comme pour les colis HA de Marcoule, les possibilités de mise en stockage des déchets solides d'exploitation et des effluents vitrifiés de l'AVM sont à examiner avant sa mise à l'arrêt définitif (familles F2-4-05 et F2-4-13).

Leur faible volume (78 m^3) pourra impliquer un co-stockage avec d'autres colis de déchets. Une option consiste à les stocker dans les mêmes alvéoles que la famille F2-3-12. Cette option de co-stockage[105] sera néanmoins à confirmer au regard des sels solubles contenus dans les déchets de la famille F2-3-12, dont notamment des nitrates susceptibles de perturber localement le potentiel d'oxydo-réduction. La question concerne aussi les familles F2-4-12, F2-4-14 et F2-4-15 (voir infra).

Quant aux déchets MAVL vitrifiés de Valduc (F2-6-03) et de La Hague (famille F2-3-11), une option similaire est de les stocker dans les mêmes alvéoles que les déchets compactés de La Hague (famille F2-3-02). La famille F2-6-03 pourrait être mise en stockage dès la fin de celle de la famille F2-3-02, et se poursuivre avec la production de nouveaux colis, en fonction des possibilités d'entreposage sur le site de production.

---

[104] Si elle était compatible avec les conditions d'entreposage d'EDS, une simplification du mode de conditionnement primaire des déchets solides d'exploitation de La Hague, sans mise en conteneur béton fibré (CBF-C'2), permettrait une diminution de ces volumes.

[105] Par précaution, cette option n'est pas prise en compte à la Figure 4.5-4 ; pour la simulation, les familles F2-4-05 et F2-4-13 ont été supposées co-stockées dans un petit module dédié avec les familles 2-4-12, F2-4-14 et F2-4-15.

La famille F2-3-11 pourrait aussi être mise en stockage simultanément avec des colis de la famille F2-3-02, selon un calendrier qui optimiserait l'utilisation des installations du site de La Hague[106].

Pour les déchets MAVL vitrifiés (familles F2-4-13, F2-3-11 et F2-6-03) une alternative consiste en des alvéoles dédiés[107] aux déchets MAVL vitrifiés. Le faible volume total (123 m^3) suggère d'examiner l'option de regrouper dans le temps la mise en stockage des trois familles concernées, dans une optique de simplification de l'exploitation. Cette mise en stockage pourrait intervenir plus tardivement pour tenir compte des perspectives de production au-delà de 2030.

4.5.2.5 Mise en stockage de résidus d'effluents liquides entreposés à l'EIP de Marcoule (famille F2-4-04)

Dans l'exercice de simulation présenté en 2009, il a été considéré que la cessation d'exploitation de l'EIP à Marcoule interviendrait à l'horizon 2050. La mise en stockage de l'ensemble des colis MAVL qui y seront entreposés pourrait alors s'effectuer avant sa mise à l'arrêt définitif.

Les boues bitumées de la STEL produites avant 1996 et reconditionnées en conteneurs de 380 litres (famille F2-4-04) feraient l'objet d'un alvéole dédié. Un flux de 450 $m^3.an^{-1}$ environ permettrait de stocker cette famille en moins de six années.

4.5.2.6 Mise en stockage des déchets de structure, technologiques et pulvérulents de Marcoule (familles F2-4-07, F2-4-09, F2-4-10 et F2-4-11)

Les déchets de structure magnésiens aujourd'hui entreposés sous forme non conditionnée à Marcoule (famille F2-4-09) nécessiteront, après leur conditionnement, une nouvelle capacité d'entreposage. Celle-ci pourrait être mutualisée avec la famille F2-4-04 (cf. chapitre 5). Dans la mesure où la production des colis de déchets de structure magnésiens s'achèverait d'ici 2030, l'étude d'une mise en stockage au plus tôt apparaît a priori moins intéressante que pour la famille F2-4-04 car elle aurait moins d'impact sur la capacité d'entreposage à créer. Aussi le scénario esquissé à la Figure 4.5-6 privilégie une utilisation dans la durée de cette capacité d'entreposage : la mise en stockage interviendrait à partir de 2060, après celle des colis de déchets entreposés dans l'EIP, voire à l'horizon de 2070 avec une hypothèse d'exploitation de l'entreposage jusqu'à une cinquantaine d'années. Un flux de 300 $m^3.an^{-1}$ environ correspondrait à un désentreposage en cinq années.

Cependant une mise en stockage plus précoce d'une partie des colis de la famille F2-4-09 pourrait être examinée, particulièrement dans l'hypothèse évoquée plus haut d'un maintien en entreposage de colis de la famille F2-4-04 extraits des casemates de Marcoule à partir de 2017 (cf. chapitre 5).

Les familles F2-4-10 et F2-4-11 (1 290 m^3 au total) relèvent potentiellement d'un même alvéole de stockage. Un flux de 400 $m^3.an^{-1}$ environ conduirait à une mise en stockage sur une durée de trois ans. La famille F2-4-07 (332 m^3) pourrait être stockée aussi dans cet alvéole, ou plus précocement, comme présenté à la Figure 4.5-6, avec la famille F2-5-02 de Cadarache (voir infra).

[106] Comme dans le cas de la famille F1-3-02, une mise en stockage avant la mise à l'arrêt définitif de R7, T7 et de la tranche initiale de E-EV-SE évitera un nouveau besoin d'entreposage. La période et la durée de mise en stockage pourront être optimisées vis-à-vis des besoins en transports.

[107] En évitant la proximité de grandes masses de béton, des alvéoles dédiés favoriseraient le confinement des déchets par le verre dans lesquels ils sont incorporés.

4.5.2.7 Mise en stockage de boues et concentrats cimentés de Valduc (famille F2-6-02)

Les fûts de boues et de concentrats cimentés du centre CEA de Valduc de la famille F2-6-02 qui sont entreposés sur le centre de Cadarache dans l'installation CEDRA FI, représentent un volume modeste de 81 m^3, suggérant un co-stockage avec d'autres déchets MAVL. Une possibilité consiste en un co-stockage avec les déchets de structure magnésiens de Marcoule (famille F2-4-09 ci-dessus). La mise en stockage interviendrait alors à partir de 2060-2065.

4.5.2.8 Mise en stockage des déchets de Cadarache (familles F2-5-01, F2-5-02, F2-5-03, F2-5-04, F2-5-05, F2-5-06, F2-9-01)

Dans l'exercice de simulation préliminaire présenté en 2009, les colis de déchets MAVL de Cadarache entreposés dans la première tranche de CEDRA ont été supposés mis en stockage à partir de l'horizon 2055-2056 afin de préparer la mise à l'arrêt de cette tranche. Les autres suivraient avec la CDE des extensions de CEDRA (cf. chapitre 3).

Une partie des colis de boues de filtration cimentées entreposés en coques béton de 500 litres (famille F2-5-02) pourront être stockés dans le même type d'alvéole que la famille F2-4-07, dans la continuité de la mise en stockage de cette dernière. Un flux de 450 $m^3.an^{-1}$ conduirait à un désentreposage en quatre années environ (Figure 4.5-6).

Pour l'autre partie de la famille F2-5-02, avec une hypothèse d'extraction des fûts de déchets des coques béton pour une plus grande compacité de stockage[108], ce fûts pourraient être co-stockés avec les familles F2-4-09 et F2-6-02 présentées plus haut, au même horizon temporel que ces familles. Un flux[109] de 675 $m^3.an^{-1}$ permettrait un désentreposage en un peu plus de six mois.

Les déchets solides d'exploitation faiblement irradiants en fûts métalliques de 870 litres (famille 2-5-04) représentent le plus grand volume des déchets de Cadarache (6 082 m^3). Ils pourraient être mis en stockage progressivement jusqu'à la mise à l'arrêt définitif des extensions de CEDRA. Un flux de 400 $m^3.an^{-1}$ environ conduirait à une mise en stockage en une quinzaine d'années.

Les déchets solides d'exploitation moyennement irradiants en fûts acier de 500 l (famille 2-5-05) et les coques béton de déchets solides cimentés (famille F2-5-06) pourront être stockés dans le même type d'alvéole. Il avait été considéré dans l'exercice de simulation présenté en 2009 que la mise en stockage de la famille F2-5-06 interviendrait dans la continuité de celle de la famille F2-5-05.

L'exercice présenté en 2009 faisait l'hypothèse d'un transfert des colis blocs sources (famille F2-9-01) et des colis de sulfates de plomb radifères (famille F2-5-01) de l'INB 56 vers CEDRA. Les fûts de 700 litres de concentrats d'évaporation cimentés reconditionnés en conteneur métallique de 1070 l (famille 2-5-03) et les colis « blocs sources » (famille F2-9-01) étaient supposés pouvoir être désentreposés lors de la CDE de l'extension de CEDRA et co-stockés dans le même alvéole, à l'horizon de 2070. De même les colis de sulfates de plomb radifères (famille F2-5-01) étaient supposés être mis en stockage avant la mise à l'arrêt de cette installation.

[108] L'enlèvement des coques en béton concerne une partie de la famille F2-5-02 (Cf. chapitre 2).

[109] Ce flux est évalué sur la base du volume unitaire de 0,5 m^3 considéré dans l'Inventaire national. Après enlèvement de la coque béton, le flux réel de colis primaires serait de 300 $m^3.an^{-1}$ environ pour un volume unitaire de 0,22 litres.

4.5.2.9 Mise en stockage des déchets des réacteurs RNR et de l'Atelier pilote de Marcoule (familles F2-4-12, F2-4-14, F2-4-15)

Les familles F2-4-12, F2-4-14 et F2-4-15[110] représentent un faible volume (289 m^3), justifiant un co-stockage avec d'autres déchets MAVL, particulièrement la famille F2-4-05. La mise en alvéole dès l'horizon 2050, avant la mise à l'arrêt définitif des bâtiments S et ES de la Hague est une possibilité. Comme indiqué plus haut pour la famille F2-4-05, une option de co-stockage avec la famille F2-3-12 simplifierait les conditions d'exploitation.

De façon analogue à la famille F2-4-09, un décalage dans le temps serait envisageable avec une exploitation plus longue de la capacité d'entreposage à créer spécifiquement à Marcoule pour les déchets MAVL hautement irradiants (projet DIADEM, voir le chapitre 5). Cependant ce décalage posera la question des possibilités de co-stockage avec d'autres déchets.

4.5.2.10 Mise en stockage des déchets d'exploitation et de déconstruction des réacteurs électronucléaires EDF (famille F2-2-03[111])

Compte tenu du projet d'installation de conditionnement et d'entreposage sur le site de Bugey (ICEDA, cf. chapitre 5), les déchets activés d'EDF pourraient être mis en stockage à l'horizon de la CDE de ce projet, qui avait été supposée intervenir à partir de 2065 dans l'exercice de simulation présenté en 2009. Un flux[112] de 450 $m^3.an^{-1}$ conduirait à une mise en stockage sur environ six années des colis produits jusqu'en 2030.

4.5.2.11 Mise en stockage des déchets technologiques alpha entreposés à La Hague (F2-3-10)

L'exercice de simulation présenté en 2009 retenait que, dans une hypothèse de compactage, les déchets technologiques contaminés en émetteurs alpha de la famille F2-3-10 ne seraient stockés qu'après une durée préalable d'entreposage d'une centaine d'années, permettant de bénéficier d'une décroissance de leur dégagement d'hydrogène par radiolyse. Cette hypothèse conduit à un début de mise en stockage après 2100.

4.5.3 Simulations paramétriques complémentaires

Diverses simulations ont été effectuées montrant l'intérêt d'inscrire l'élaboration des chroniques d'entreposage, de désentreposage et de mise en stockage dans une optique d'optimisation d'ensemble, en prenant en compte les contraintes d'exploitation des différents sites. La Figure 4.5-7 présente ainsi une chronique de mise en stockage des déchets MAVL légèrement différente de la précédente qui permettrait de diminuer le flux de colis de stockage transféré dans l'installation souterraine en le lissant davantage sur la durée (Figure 4.5-8).

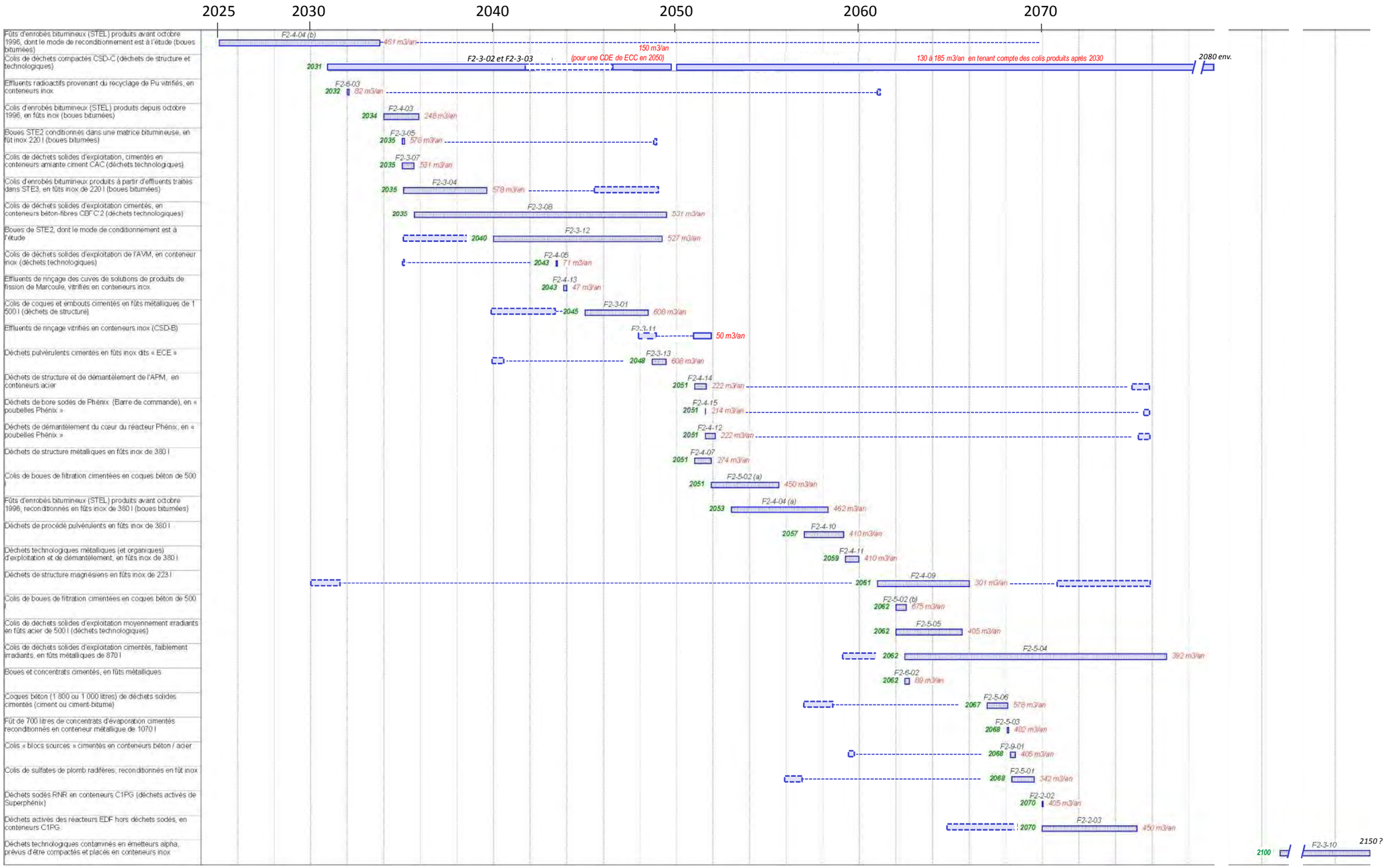
Partant de cette chronique, la Figure 4.5-9 montre l'impact d'un décalage dans le temps de la CDE des bâtiments d'entreposage S-ES et EDS, dans lesquels sont entreposés 40 pourcents environ du volume des colis MAVL produits en 2030 d'après l'IN 2009. Dans cet exemple, le décalage de CDE ne semble pas présenter d'intérêt industriel vis-à-vis de l'exploitation du stockage.

---

[110] L'entreposage des aiguilles de barres de commande des réacteurs à neutrons rapides (famille F2-4-15) permet la décroissance des produits d'activation irradiants que ces déchets contiennent avant l'expédition vers le centre de stockage. Cette opportunité est retenue par le PIGD.

[111] Pour mémoire l'IN 2009 individualisait la famille F2-2-02, qui ne figure plus dans l'IN 2012.

[112] Des possibilités de réduire le volume des familles F2-2-02 et F2-2-03 pourraient être étudiées, sur la base d'une simplification du mode de conditionnement ou d'un conteneur « C1PG » réversible, comme cela se pratique aujourd'hui pour la famille F2-5-02.



Nota : La mise en stockage des déchets de démantèlement produits après 2030 n'est pas représentée.

Figure 4.5-6 Esquisse de chronique de mise en stockage des colis de déchets MAVL présentée en 2009

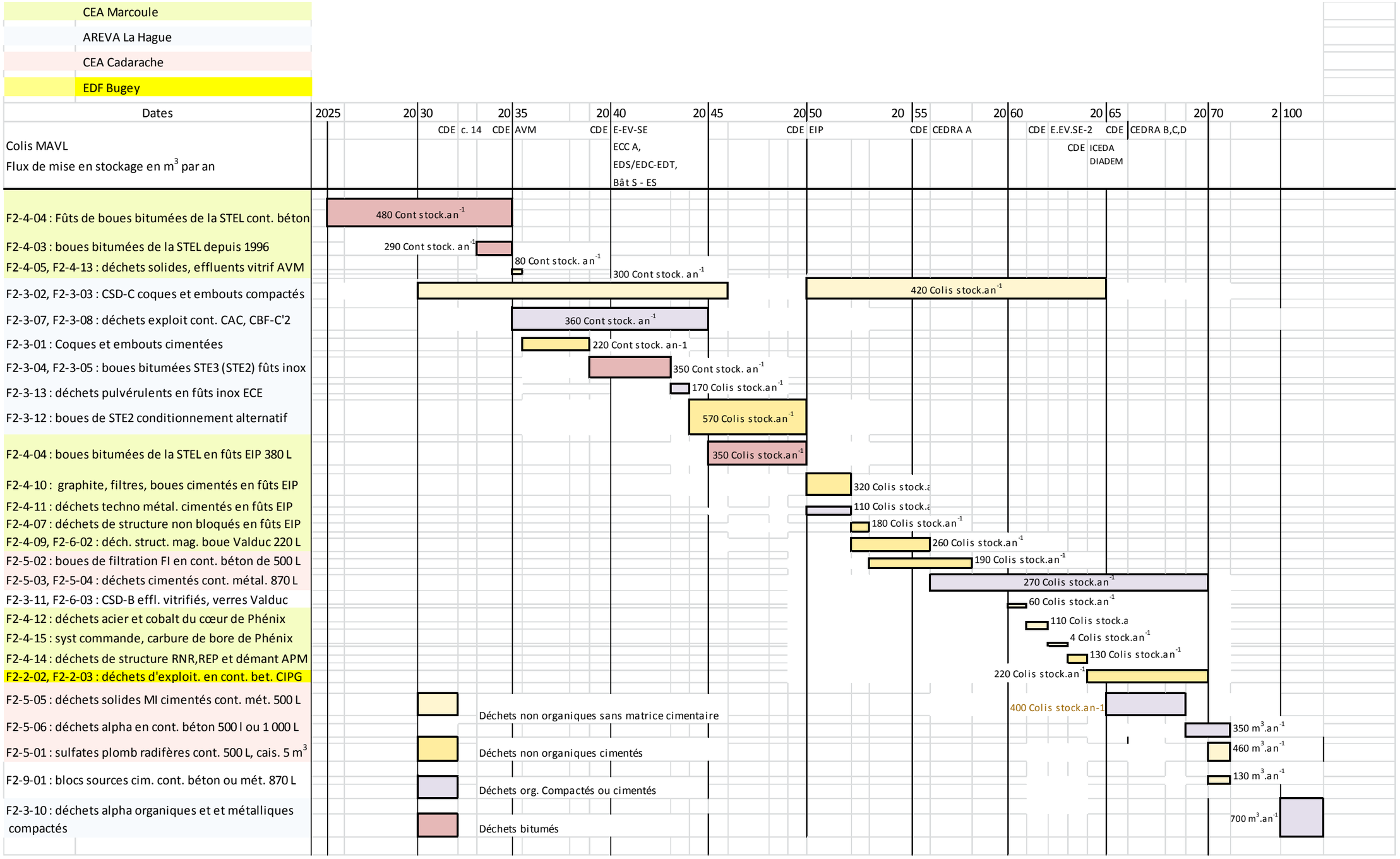


Figure 4.5-7 Variante de chronique de mise en stockage des colis de déchets MAVL étudiée en 2009

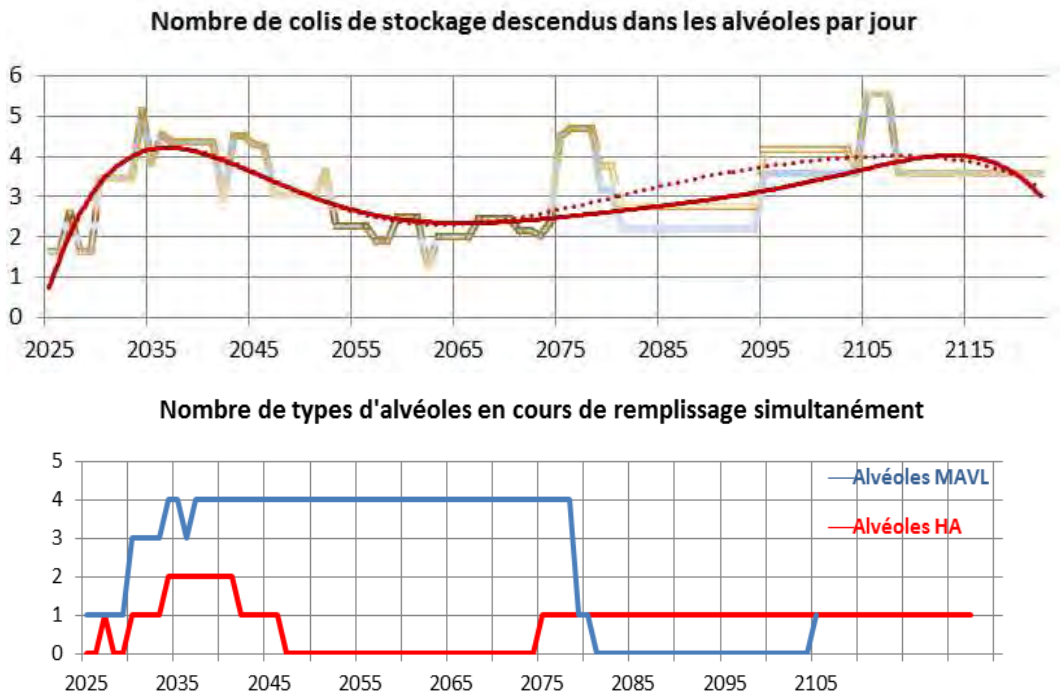


Figure 4.5-8 *Simulation variante : flux journalier de colis de stockage MAVL (en haut) et nombre de types d'alvéoles exploités simultanément (en bas) dans l'hypothèse d'une CDE de S, ES et EDS en 2040 [2009]*

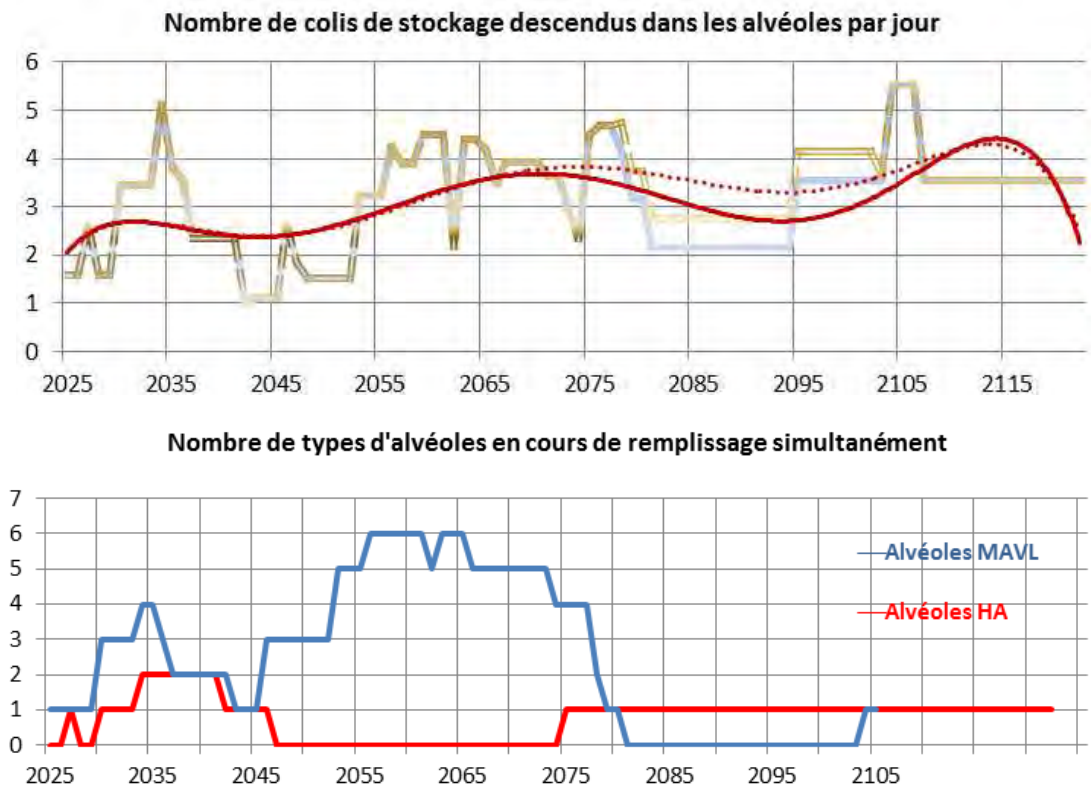


Figure 4.5-9 *Simulation variante : hypothèse d'une CDE de S, ES et EDS en 2050 [2009]*

4.6 Chroniques de mise en stockage du programme industriel de gestion des déchets (2012)

Dans la continuité des exercices précédents de simulation exploratoire, Areva, le CEA, EDF et l'Andra ont poursuivi de 2010 à 2012 l'étude de scénarios de la gestion industrielle des déchets HA et MAVL.

Une première étape a constitué en l'établissement de la première version du « programme industriel de gestion des déchets » (PIGD). Ce programme fixe l'inventaire des déchets à retenir pour le projet Cigéo et définit l'ordonnancement et les flux prévisionnels de livraison des colis (Figure 4.6-1, Figure 4.6-2 et Figure 4.6-3). Il vise à planifier et mettre en cohérence les moyens industriels à mettre en œuvre dans le cadre du développement de ce projet.

Le PIGD a été une donnée d'entrée de l'Andra pour lui permettre de mener en 2012 les études d'esquisse industrielle du projet Cigéo et de préparer le débat public.

Pour établir l'inventaire à retenir pour le projet Cigéo, Areva, le CEA et EDF ont défini un « scénario industriel » (S.I.) cohérent avec leurs déclarations pour l'établissement de l'IN 2012. Ce scénario décrit la poursuite de la production électronucléaire avec traitement de la totalité des combustibles nucléaires déchargés des réacteurs (à l'exception des combustibles du réacteur EL4). La durée d'exploitation prise conventionnellement en référence pour tous les réacteurs électrogènes en exploitation et pour le réacteur EPR Flamanville 3 est de cinquante ans. Ces hypothèses ne préjugent pas des résultats du réexamen décennal de sûreté des réacteurs, ni des modalités liées, le cas échéant, à l'allongement de la durée d'exploitation de ces réacteurs au-delà des 50 ans d'exploitation prise en référence et/ou au renouvellement éventuel du parc par un déploiement de réacteurs de troisième génération (EPR) et/ou par des réacteurs de quatrième génération. Le scénario industriel considère que les matières[113] (uranium et plutonium) non valorisées dans les 58 réacteurs REP actuels et l'EPR Flamanville 3 pourront l'être dans des installations futures.

Le PIGD vise à prendre en compte au mieux les besoins d'expédition des producteurs tout en s'assurant de la compatibilité en termes de flux et de besoins logistiques depuis l'entreposage jusqu'au stockage.

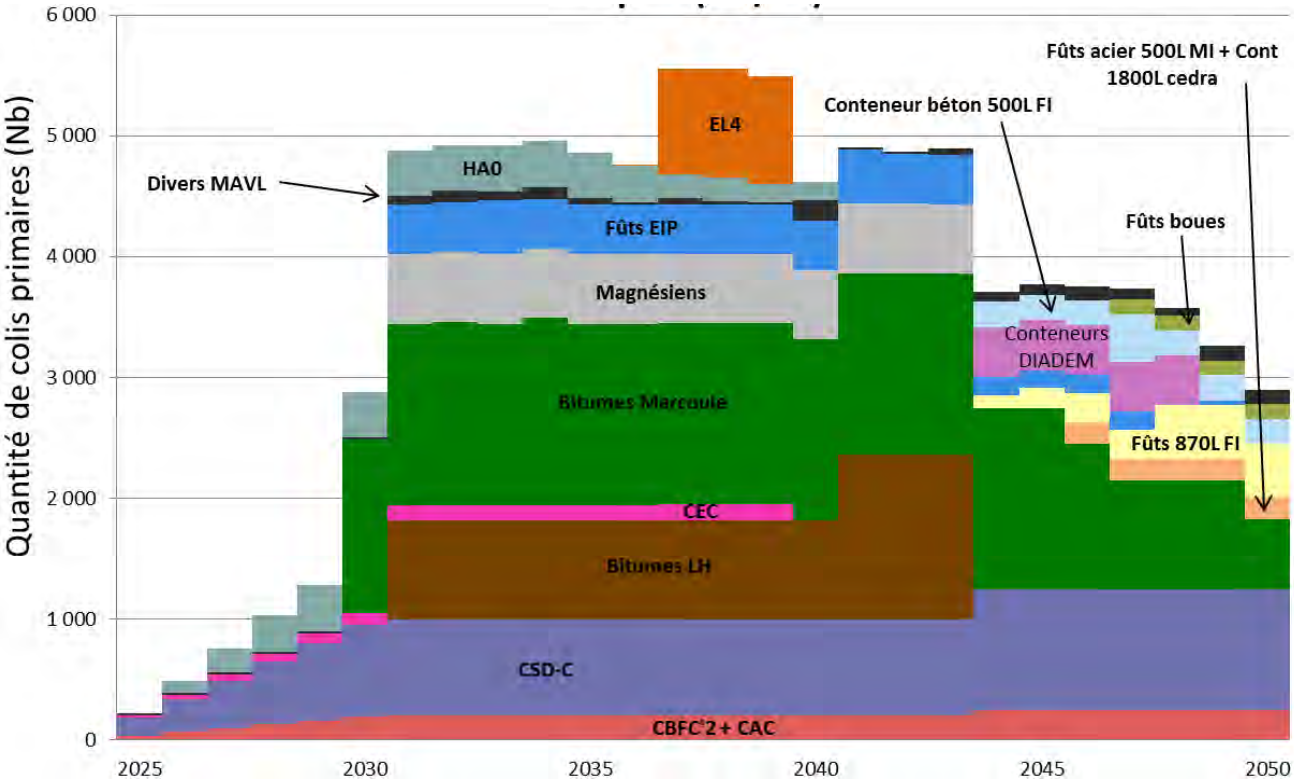
Les principes retenus pour son établissement ont été :

- une montée en puissance progressive de Cigéo sur la période 2025-2030 ;
- la définition d'un scénario de livraison de référence pour la période 2025-2029, comprenant en particulier des colis CSD-C ; le stockage des enrobés bitumineux sur cette période est étudié dans le cadre d'un scénario optionnel ;
- le stockage majoritaire, d'ici 2050, des déchets produits à ce jour ;
- un lissage des flux de colis de stockage à transférer dans l'installation souterraine ;
- la mise en stockage des CSD-V fortement exothermiques à partir de 2075, permettant de bénéficier d'une décroissance thermique notable ;
- la possibilité d'une poursuite du stockage de déchets non ou faiblement exothermiques au-delà de 2075 ;
- la possibilité d'une exploitation de Cigéo jusqu'en 2140 (réception de colis puis fermeture).

Tous les colis expédiés depuis La Hague, Cadarache, Valduc et Bugey sont supposés livrés à Cigéo sous forme de colis primaires (CP). Ils seront placés en conteneur de stockage sur le site de Cigéo, avant leur mise en stockage.

Une mise en conteneur de stockage des colis de déchets MAVL est envisagée sur le site de Marcoule pour certaines familles de colis, conduisant à un transport et une livraison réalisés par le CEA sous cette forme.

[113] Conformément à la loi de programme du 28 juin 2006, l'inventaire de Cigéo ne comporte pas de matières. Les déchets produits par un éventuel futur parc de réacteurs ne sont pas pris en compte.



Abréviations :

- CBF-C'2 + CAC : colis de déchets technologiques cimentés en conteneurs béton fibre ou amiante-ciment (F2-3-07, F2-3-08)
- CSD-C : colis standard de déchets de structure et technologiques compactés (F2-3-02)
- Bitumes LH : colis d'enrobés bitumineux de La Hague (F2-3-04, F2-3-05)
- CEC : coques et embouts [déchets de structure] cimentés (F2-3-01)
- Magnésiens : colis de déchets de structure magnésiens (F2-4-07)
- Fûts EIP : colis de déchets technologiques, de procédé et de structure en conteneurs de 380 litres (F2-4-07, F2-4-10, F2-4-11)
- HA0 : colis de déchets HA vitrifiés moyennement exothermiques (F1-3-02, F1-4-01, F1-5-01)
- EL4 : combustibles usés du réacteur EL4 (F1-5-02)
- Conteneurs DIADEM : colis de déchets de structure, technologiques et de démantèlement entreposés dans la future installation DIADEM de Marcoule (F2-4-12, F2-4-14, F2-4-15)
- Conteneur béton 500L FI : colis de boues et concentrats en conteneur béton de 500 litres (F1-5-02)
- Conteneur acier 500L MI : colis de déchets technologiques et de démantèlement en conteneur acier de 500 litres (F2-5-05)
- Fûts 870L FI : colis de boues et concentrats et de déchets technologiques en conteneur de 870 litres (F2-5-04)

Figure 4.6-1 Chronique de référence de mise en stockage sur la période 2025 - 2050 (PIGD) : nombre de colis de déchets primaires réceptionnés par an sur Cigéo

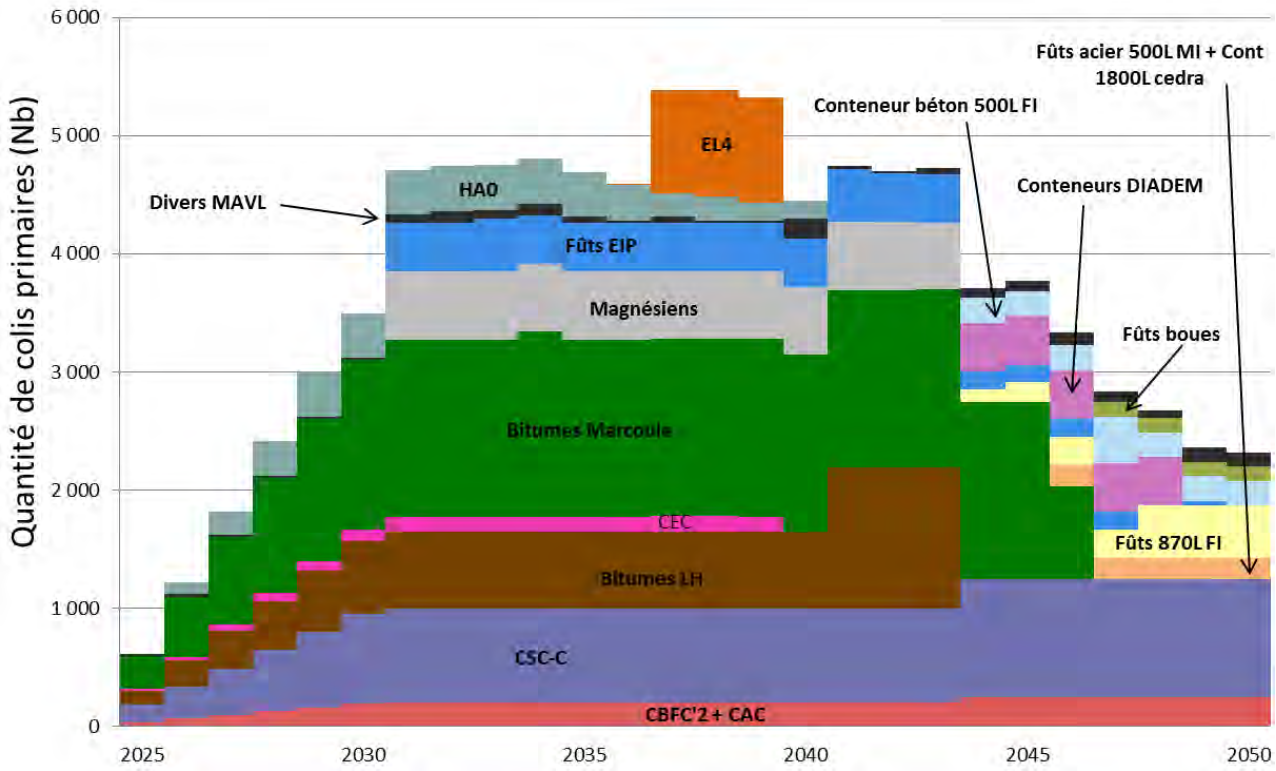


Figure 4.6-2 *Chronique optionnelle de mise en stockage sur la période 2025 - 2050 (PIGD)*

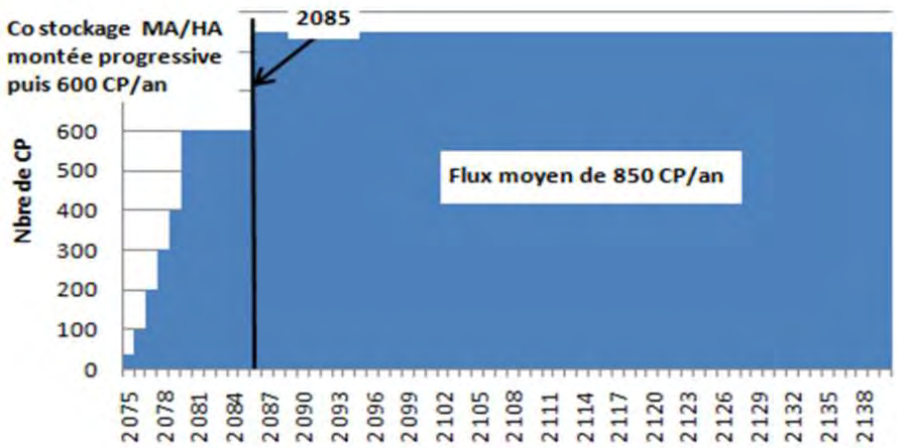


Figure 4.6-3 *Chronique de mise en stockage de colis de déchets HA vitrifiés fortement exothermiques*

5

Recensement des besoins en entreposage

5.1 Besoins en capacités supplémentaires d'entreposage de déchets HA 141
5.2 Besoins en capacités supplémentaires d'entreposage de déchets MAVL 150
5.3 Fonctionnalités de l'entreposage et objectifs de sûreté 162

Tous les colis de déchets HA et MAVL produits d'ici 2025 seront entreposés sur les sites de production ou de conditionnement dans l'attente de la mise en exploitation du centre de stockage. Après cette mise en exploitation, sous réserve des autorisations afférentes, la mise en stockage de colis de déchets HA et MAVL diminuera progressivement les besoins en capacités d'entreposage.

Ces besoins correspondront alors à :

- L'attente de l'acceptation des colis de déchets en stockage ; sans préjudice du processus d'agrément de chaque famille, cette attente recouvre la durée de décroissance radioactive[114] de certaines familles de colis de déchets, introduite au chapitre 4, pour rendre les colis compatibles avec le stockage.
- L'attente de la réalisation d'alvéoles de stockage aptes à accueillir chaque famille de colis, et celle de la disponibilité de moyens de désentreposage, de contrôle, de transport et de mise en stockage, dont la capacité opérationnelle limitera les flux mis en stockage.
- La possibilité de poursuivre une surveillance de l'évolution de certains colis, le cas échéant sur la base de colis témoins qui seraient conservés en entreposage alors que l'essentiel du volume des familles concernées aurait été mis en stockage ; les volumes de colis entreposés seraient alors marginaux.
- La possibilité d'entreposer des colis de déchets qu'il serait décidé de récupérer, en soutien à la réversibilité du stockage.

On cherchera à exploiter au maximum les capacités d'entreposage existantes décrites au chapitre 3, dans la continuité de l'analyse présentée au chapitre 4 pour esquisser des scénarios de stockage.

Cependant les capacités existantes ne suffisent pas à attendre la mise en exploitation du centre de stockage. C'est pourquoi le CEA a engagé la construction d'une installation d'entreposage de déchets MAVL à Marcoule (projet DIADEM) et prévoit d'étendre l'installation de conditionnement et d'entreposage des déchets radioactifs CEDRA à Cadarache. De même EDF construit des capacités d'entreposage dans l'installation de conditionnement des déchets activés sur le site de Bugey (projet ICEDA). Une extension de l'entreposage des verres Sud-Est (E-EV-SE) est en cours de construction à la Hague pour accueillir la production de colis HA vitrifiés fortement exothermiques. Dans la décennie 2015–2025, Areva envisage d'autres extensions : une deuxième extension de E-EV-SE et l'extension de l'entreposage des coques compactées ECC à La Hague. Le CEA prévoit également de réaliser une installation d'attente d'évacuation (IAE) sur le site de Marcoule et/ou une extension de l'EIP.

Ce chapitre présente le recensement des besoins en entreposage fourni en 2009, fondé sur les données de l'IN 2009, complété par les travaux menés en concertation entre l'Andra, Areva, le CEA et EDF de 2010 à 2012. Il montre que les créations et extensions d'installations projetées d'ici 2025 permettront de répondre, en termes de capacité et de durée, aux besoins d'entreposage des colis de déchets HA et MAVL produits à cet horizon. Il présente l'état des réflexions sur les besoins de nouvelles capacités d'entreposage à créer au-delà.

Ce recensement est complété par une présentation générale des fonctionnalités et des objectifs de sûreté en entrée à la conception de futurs entrepôts, fondée notamment sur l'analyse de la réglementation.

Il est à noter que le recensement présenté ici ne rend pas compte des besoins en entreposage de transit de courte durée à chaque étape de la chaîne de gestion des colis. Il ne couvre pas la gestion, à chaque étape, de colis particuliers qui feraient l'objet d'une non-conformité en attente de traitement.

[114] Ou la décroissance du dégagement de gaz.

5.1 Besoins en capacités supplémentaires d'entreposage de déchets HA

Dans la suite, on montre que pour les déchets HA moyennement ou faiblement exothermiques, les besoins à venir renvoient particulièrement aux modalités de désentreposage. A l'inverse, la production future de déchets fortement exothermiques générera d'importants besoins en nouvelles capacités d'entreposage.

5.1.1 Déchets HA moyennement ou faiblement exothermiques

Famille F1-4-01 (déchets HA vitrifiés de l'AVM)

La possibilité d'utiliser le SVM jusqu'à l'expédition vers Cigéo des colis HA vitrifiés de la famille F1-4-01, évitera de créer de nouvelles capacités d'entreposage pour gérer ces colis en attente de stockage[115]. L'atelier ne dispose pas d'interface de chargement pour la mise en emballage de transport des colis de déchets qui y sont entreposés, L'expédition de ces derniers impliquera de se doter d'un tel interface et plus généralement de moyens de désentreposage, de contrôle et de transport. Les scénarios de stockage présentés au chapitre 4 impliquent de développer ces moyens d'ici 2025.

L'étude exploratoire de scénarios entreposage-stockage remise en 2009 ouvrait sur l'alternative entre une mise en conteneur de stockage sur le site de Marcoule ou dans un atelier de Cigéo et proposait d'étudier et de comparer les deux possibilités vis-à-vis du transport et du contrôle[116]. Le PIGD (2012) retient l'expédition des déchets sous forme de colis primaires par groupes de 15 dans des emballages TN28 aménagés pour les adapter à leurs dimensions[117], selon un flux maximal de l'ordre de 400 colis primaires de déchets par an (de 2026 à 2035).

Famille F1-5-01 (déchets HA vitrifiés PIVER)

Les scénarios de stockage présentés au chapitre 4 reposent sur une mise à l'arrêt définitif du bâtiment d'entreposage de l'Atelier pilote de Marcoule (APM, bâtiment 213), à l'horizon 2028-2030. Le désentreposage, la mise en conteneur de stockage et le transport renvoient aux mêmes questions que les colis de l'AVM.

Famille F1-3-02 (CSD-U - solutions molybdiques vitrifiées de La Hague)

En attente de mise en stockage, l'entreposage des colis de solutions molybdiques vitrifiées de La Hague s'effectuera avec les déchets HA fortement exothermiques (CSD-V) de la famille F1-3-01 (voir infra). Le désentreposage s'effectuera a priori selon les mêmes processus que les CSD-V qui sont retournés aux clients étrangers d'Areva. Le PIGD prévoit l'utilisation d'emballages de transport TN28 à raison de 150 à 300 colis primaires par an. L'expédition pourra s'effectuer à partir de l'installation DRV de La Hague concomitamment avec les colis MAVL des familles F2-3-02 (CSD-C) et F2-3-11 (CSD-B).

[115] Une mise en stockage avant la mise à l'arrêt définitif de l'AVM/SVM concerne aussi les familles MAVL F2-4-05 et F2-4-14, également entreposées dans cet atelier.
[116] En particulier, les colis reçus sur le centre de stockage seront exempts de contamination surfacique externe.
[117] Une adaptation de l'emballage TN28 utilisé pour les CSD-V sera étudiée pour le transport de colis primaires AVM. De par leur grande capacité, de tels emballages sont susceptibles d'optimiser le nombre de transports. En revanche, leurs masse et longueur élevées impactent les infrastructures et les moyens de transport et de levage à prévoir.

Famille F1-5-02 (combustibles usés EL4)

De façon analogue aux colis de déchets vitrifiés de l'AVM, une mise en stockage des combustibles usés EL4 avant la mise à l'arrêt définitif de Cascad évitera la création de nouvelles capacités d'entreposage. A l'instar des colis de déchets HA de l'AVM, l'étude exploratoire de scénarios entreposage-stockage remise en 2009 ouvrait sur deux options quant au lieu de mise en conteneur de stockage. Le PIGD retient l'expédition des combustibles EL4 à l'aide d'emballages TN – MTR[118], la mise en conteneur de stockage s'effectuant sur le site de Cigéo.

5.1.2 Déchets HA fortement exothermiques

Comme indiqué au chapitre 4, le dégagement thermique des CSD-V de la famille F1-3-01 devra avoir suffisamment décru avant leur mise en stockage. La durée d'entreposage minimale est de 60 ans pour les colis actuels, et devra être portée à 70 ans pour des productions futures. Pour mémoire, une durée d'entreposage plus longue, jusqu'à une centaine d'années, permettrait d'économiser des ressources de stockage ; le PIGD retient une durée d'entreposage de 85 ans.

Pour gérer les colis de la famille F1-3-01 dans l'attente de leur stockage, il sera nécessaire de créer de nouvelles capacités d'entreposage, en plus des entrepôts actuels de R7 et T7, de E-EV-SE et de son extension en cours de construction (cf. chapitre 3). La famille F2-3-11 est également à prendre en compte (CSD-B MAVL). Areva envisage ainsi, à l'heure actuelle, la mise en service de deux capacités d'entreposage de l'ordre de 8 400 places (soit 1 470 m^3), l'une en 2022 et l'autre en 2032.

L' et les figures associées (pages 144 à 148) rendent compte du recensement des besoins présenté en 2009 (fondé sur l'IN 2009).

Encadré 5.1-1 Le recensement des besoins présenté en 2009

En 2009, les besoins totaux en nouvelles capacités pour accueillir les colis produits à partir de 2025 ont été évalués à 3 730 m^3 sur la base de l'IN2009, ces besoins se répartissant en :

- 830 m3 environ pour la période 2025 à 2030 ;
- 725 m3 pour chacune des quatre périodes 2030-2035, 2036-2040, 2041-2045 et au-delà de 2045.

De plus, l'hypothèse de l'IN2009 d'une CDE des entrepôts actuels en 2040 conduisait à envisager l'option d'en retirer les colis au cours de la décennie 2040-2050. Si les colis CSD-U (famille F1-3-02) et les colis CSD-B d'effluents de rinçage vitrifiés (famille F2-3-11) étaient alors stockés, les colis de la famille F1-3-01 devraient encore attendre au moins quelques années, induisant dans cette option un besoin de capacité supplémentaire de 1 940 m^3.

Tout en respectant les durées minimales de décroissance thermique avant stockage, une hypothèse de fin de désentreposage de R7 et T7 entre 2060 et 2065, et de E-VE-SE à l'horizon 2070 éviterait toute capacité supplémentaire dans un scénario de mise en stockage des premiers colis en 2050.

[118] L'emballage TN-MTR dans sa configuration actuelle offre 4 alvéoles. Un réaménagement devrait porter ce nombre à 30 alvéoles, afin d'optimiser le flux d'emballages expédiés vers Cigéo.

Avec cette hypothèse, pour assurer un âge à la mise en stockage de 60 ans pour les colis produits jusqu'en 2015, et un âge de 70 ans pour tous les suivants, l'extension de E-EV-SE en cours de construction (E-EV-LH) serait mise à l'arrêt définitif en 2094, soit 82 ans entre l'accueil du premier colis et la sortie du dernier (Figure 5.1-1). La durée d'exploitation de chacune des capacités à créer ensuite (3 730 m³ au total) serait moins longue, soit environ 75 ans entre l'accueil du premier colis et la sortie du dernier. Aussi il serait possible de prolonger la durée d'entreposage des colis produits à partir de 2012. Cette durée évoluerait ainsi de 60 et 70 ans à 73 ans pour les colis produits jusqu'en 2024 et de 70 à 80 ans pour les colis produits au-delà, avec une durabilité des capacités à créer et de la première extension de E-EV-SE de 85 ans (délai entre l'accueil du premier colis et la sortie du dernier). Cela conduirait alors à la mise en stockage du dernier colis en 2131.

La création d'une capacité supplémentaire de 1 950 m³ au terme de l'exploitation de R7, T7 et E-EV-SE offre une plus grande flexibilité en matière de durée d'entreposage (notamment pour la décroissance thermique) avant mise en stockage. Quelques exemples de scénarios possibles sont donnés ci-après.

Avec une durabilité des capacités de 3 730 m³ et de celle de la première extension de E-EV-SE de 85 ans, et une durabilité de la capacité supplémentaire de 1 940 m³ de 95 ans, l'âge des colis à la mise en stockage varierait entre 94 ans pour les premiers et 86 ans pour les derniers (Figure 5.1-2). La mise en stockage des colis de la famille F1-3-01 démarrerait en 2084 et s'achèverait en 2135. Dans ce scénario, tous les colis devraient nécessairement être transférés entre deux installations d'entreposage avant leur mise en stockage. Cela permettrait d'utiliser au mieux chacune des capacités créées et de maximiser l'âge des colis à la mise en stockage.

En portant à 100 ans la durée d'exploitation des capacités d'entreposage à créer à partir de 2025, il serait possible de prolonger la durée d'entreposage de tous les colis produits à partir de 2006 à 100 ans (Figure 5.1-3). Les colis les plus anciens auraient un âge de 92 à 94 ans à la mise en stockage, ne nécessitant qu'une durabilité de 83 ans pour la capacité supplémentaire de 1 940 m³. Ce scénario limiterait les transferts incontournables entre installations d'entreposage aux colis initialement entreposés dans R7, T7 et dans la tranche initiale de E-EV-SE.

Enfin, une prolongation d'une dizaine d'années de l'exploitation de la première extension de E-EV-SE (jusqu'en 2097) permettrait d'augmenter encore l'âge de tous les déchets mis en stockage, entre 101 et 107 ans (Figure 5.1-4).

Une partie des capacités à créer pourrait être conçue pour accueillir des colis de la famille F1-3-01 après une première phase de décroissance thermique : une phase de 35 ans ramène en effet la puissance thermique du CSD-V de 2 000 watts à 700 watts (environ 1 000 watts pour les CSD-V issus du traitement de combustibles UOX et MOX en mélange). Sur la base d'un âge des colis minimum de 35 ans cette possibilité interviendrait dès la période 2030-2040 pour un volume de 1 300 m³ (Figure 5.1-5). Environ 1 000 m³ s'ajouteraient dans la période 2040-2050, d'où un volume total potentiellement concerné allant jusqu'à 2 300 m³ à l'horizon 2050 (IN2009). Cette possibilité suppose un transfert de colis depuis un entrepôt préexistant, qui accueillerait en remplacement des colis de fabrication récente.

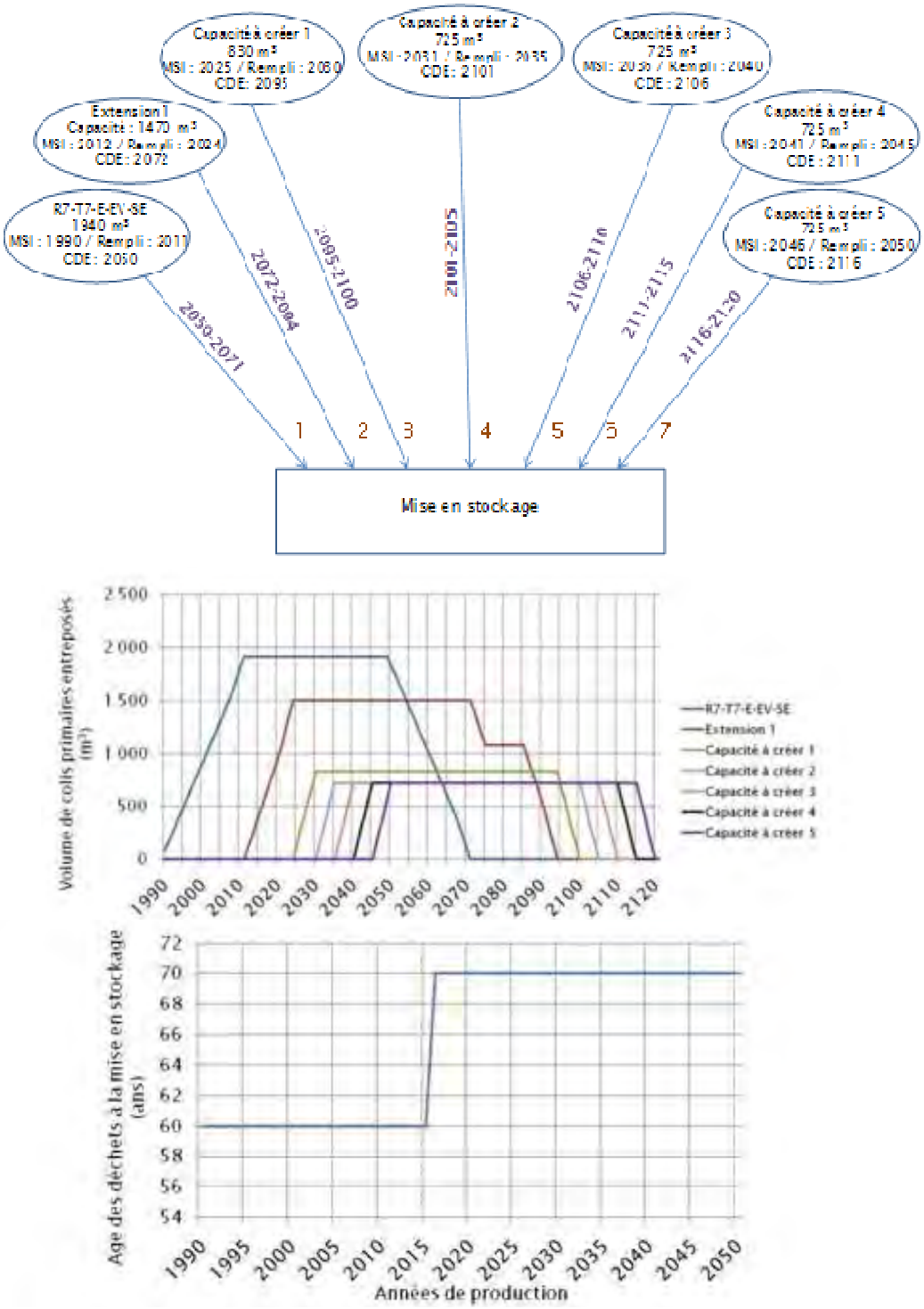


Figure 5.1-1 *Scénario d'entreposage avec report de la CDE de R7, T7 et E-EV-SE et mise en stockage au plus tôt : en haut, capacités d'entreposage existantes et à créer et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)*

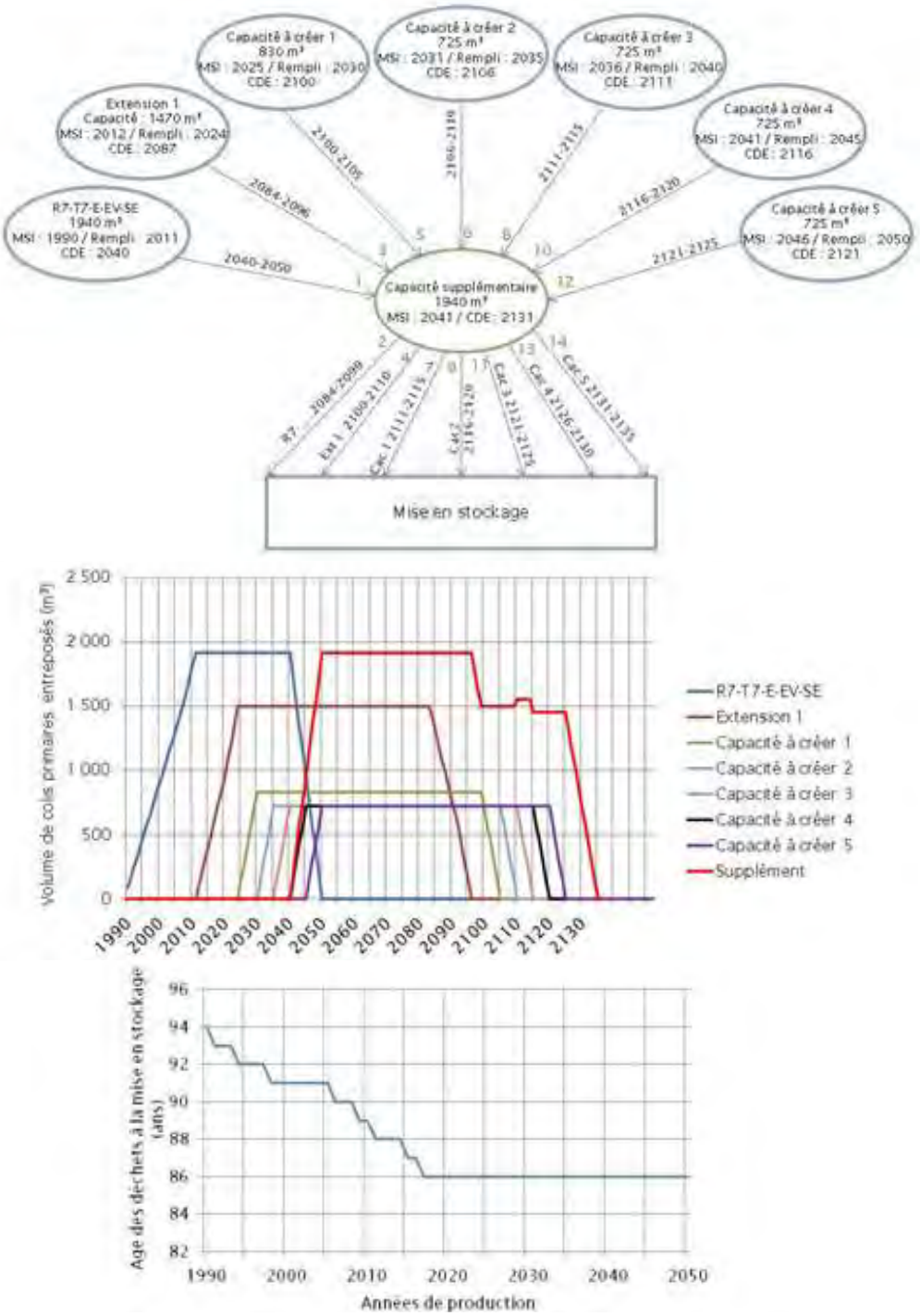


Figure 5.1-2 *Scénario d'entreposage avec une capacité supplémentaire de 1 940 m³ : en haut, capacités d'entreposage et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)*

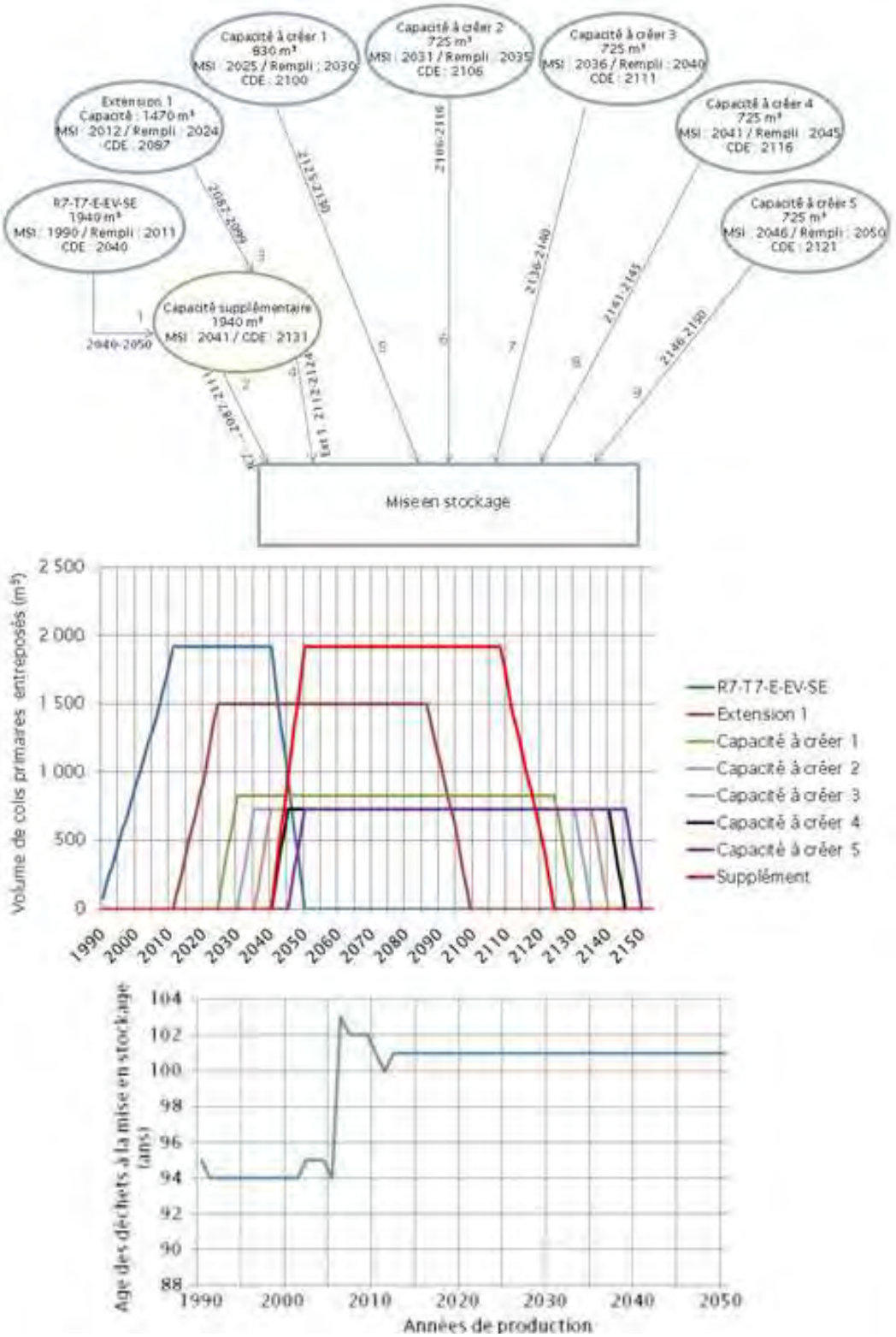


Figure 5.1-3 *Scénario d'entreposage avec une capacité supplémentaire de 1 940 m³ et une durabilité séculaire des capacités à créer : en haut, capacités d'entreposage et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)*

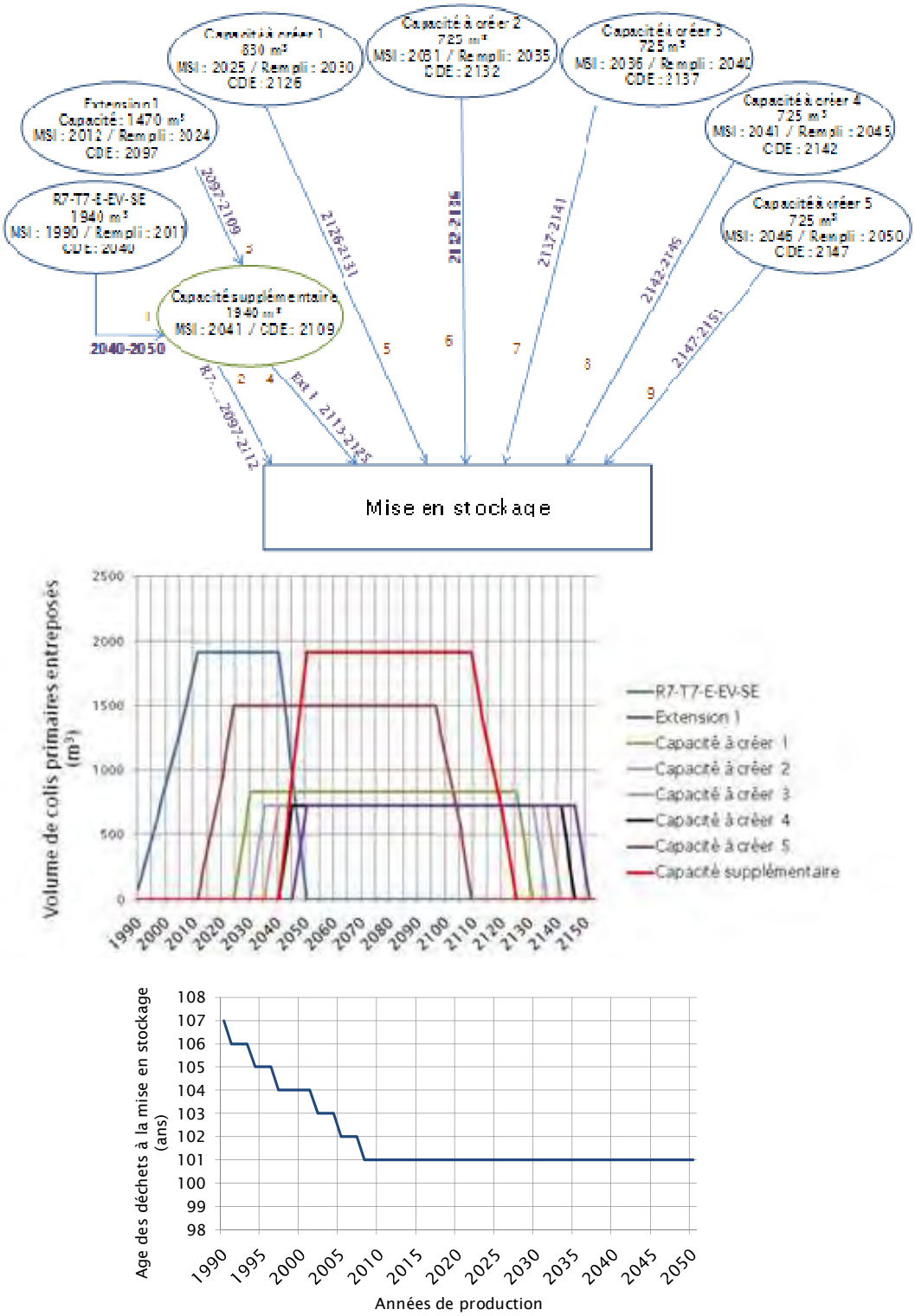


Figure 5.1-4 *Scénario d'entreposage avec une capacité supplémentaire de 1 940 m³, une durabilité séculaire des capacités à créer et un prolongement de l'exploitation de E-EV-LH : en haut, capacités d'entreposage et flux de colis ; au milieu, exploitation des capacités d'entreposage au cours du temps ; en bas : âge des déchets à la mise en stockage (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)*

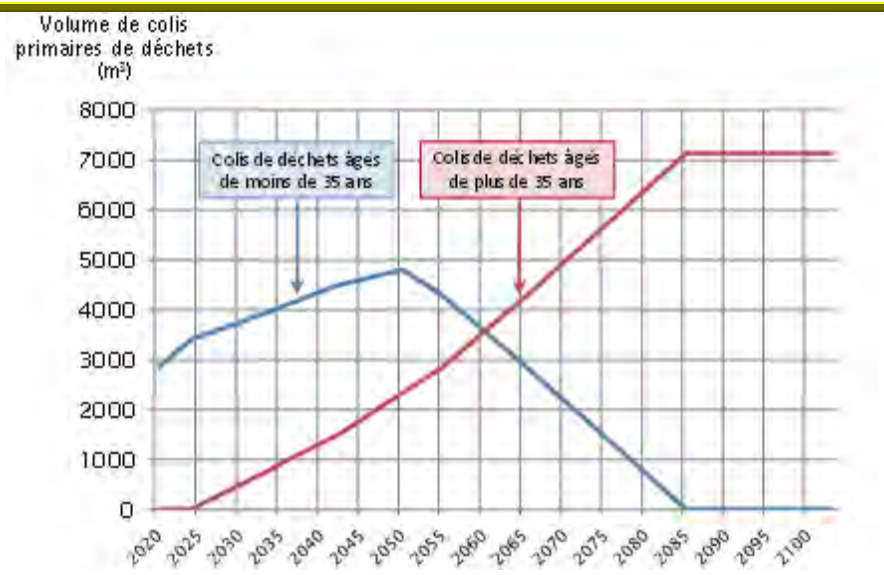


Figure 5.1-5 *Evolution du volume de colis primaires de la famille F1-3-01 âgés respectivement de moins et de plus de 35 ans (Etude présentée en 2009 fondée sur l'IN2009)*

Dans le cadre du recensement des besoins en entreposage présenté en 2009, l'impact de différents scénarios entreposage-stockage des CSD-V, CSD-U, CSD-C et CSD-B sur les transports avait été analysé, sachant que ces différentes familles de colis de déchets sont susceptibles d'utiliser des moyens d'expédition communs (l'atelier DRV à La Hague). Le scénario d'entreposage présenté à la Figure 5.1-1 avec mise en stockage des CSD-V dès 2050 entraînerait un flux de colis primaires transportés depuis La Hague de 90 $m^3.an^{-1}$ au moins, qui s'ajouterait au flux des CSD-U et CSD-C, soit un flux total jusqu'à 270 $m^3.an^{-1}$. Dans un scénario avec mise en stockage des CSD-V différée, les besoins en capacité d'expédition depuis le site de La Hague seraient lissés, l'expédition des CSD-V intervenant après celle des colis de déchets MAVL. Dans le scénario d'entreposage présenté à la Figure 5.1-3, associé à une mise en stockage à partir de 2087, le pic d'expédition avait été évalué en 2009 entre 165 et 180 $m^3.an^{-1}$ (sur la base de l'IN2009) ; il apparaîtrait à partir de 2060 à cause des CSD-C produits après 2030.

La mise en stockage des déchets HA posera la question de la gestion de colis de déchets qui seraient récupérés dans le cadre de la réversibilité, le cas échéant. Comme indiqué au chapitre 4, la construction des nouvelles installations qui seraient nécessaires dans une telle situation serait effectuée avant de procéder à la récupération des colis, particulièrement dans le cas d'un grand nombre de colis retirés. S'il s'agissait d'installations d'entreposage, les déchets pourraient y être placés sous la forme de colis de stockage tels que présentés au chapitre 4 plutôt que de colis primaires : cela éviterait une opération de découpe du surconteneur et permettrait de bénéficier de la capacité de confinement de ce dernier.

Dans le recensement des besoins en entreposage présenté en 2009, l'opportunité de recourir à des entrepôts déjà utilisés pour gérer des colis de déchets avant leur mise en stockage a néanmoins été questionnée (Encadré 5.1-2). Cela pourrait notamment intéresser des situations où le nombre de colis retirés serait limité. Une telle option impliquerait des évolutions de conception des entrepôts. Leur étude a été intégrée aux recherches menées depuis 2007 (voir le chapitre 6).

Cependant, compte tenu du caractère prospectif de cette analyse, notamment au regard des conditions de réversibilité qui seront fixées à l'avenir par le Parlement, il est apparait aujourd'hui prématuré d'anticiper sur de tels besoins dans les prévisions concernant les prochaines extensions de l'entreposage des déchets HA vitrifiés à La Hague.

Encadré 5.1-2 Opportunité d'utiliser des entrepôts d'attente avant mise en stockage pour la réversibilité (recensement des besoins présenté en 2009)

Lors de la mise en stockage des déchets HA provenant de Marcoule ou de Cadarache, les entrepôts d'origine seront généralement en cessation d'exploitation (ou proches de l'être) et ne devraient donc pas pouvoir recevoir des colis retirés du stockage, le cas échéant. De plus ils ne sont pas adaptés à des colis de stockage.

Dans les futures installations d'entreposage de CSD-V, il serait possible de disposer d'emplacements d'entreposage libérés par une mise en stockage et de leur conférer la potentialité d'accueillir des colis récupérés dans le cadre de la réversibilité. Pour soutenir la réversibilité, les emplacements d'entreposage correspondants devraient si possible être conçus initialement pour accepter les colis primaires CSD-V et les colis de stockage de la famille F1-3-01. Dans une optique de mutualisation du soutien à la réversibilité, on pourrait chercher à étendre cette polyvalence aux autres colis de stockage de déchets HA, notamment ceux issus de l'AVM (famille F1-4-01). Avec une durabilité des installations d'entreposage de 100 ans, la possibilité de gérer des colis récupérés du stockage serait assurée au moins jusqu'à l'horizon 2140.

La perspective d'entrepôts conçus pour des déchets présentant un dégagement thermique réduit faciliterait la recherche de solutions techniques polyvalentes en soutien à la réversibilité.

En 2009, la localisation de futures capacités d'entreposage de CSD-V avait aussi été questionnée : certaines capacités d'entreposage à créer à l'horizon 2040 pourraient-elles être localisées sur le site de stockage en alternative au site de La Hague ?

Plusieurs scénarios possibles de création de capacités d'entreposage de colis de déchets HA avaient été présentés, prenant en compte les diverses options en matière de début de mise en stockage des CSD-V (dès 2050 ou ultérieurement), de capacités, de durées d'exploitation et de localisation des entrepôts. Il était proposé de renvoyer les choix entre ces différentes options à un processus décisionnel par étapes : entre 2020 et 2040, ce processus pourrait comporter des jalons tous les 5 à 10 ans, permettant d'intégrer le retour d'expérience et les évolutions techniques et sociales. Un tel processus pourrait être relié à la gouvernance du stockage dans la logique de réversibilité.

Dans ce contexte la question de la localisation éventuelle d'un entrepôt sur le site de stockage renvoyait à un jalon décisionnel à l'horizon 2030 ou au-delà avec l'examen des éléments suivants : (i) des capacités d'entreposage sur le site de stockage en soutien à la réversibilité permettraient d'éviter le transport d'éventuels colis récupérés vers le site de La Hague ; (ii) elles pourraient générer une activité industrielle supplémentaire ; (iii) elles seraient susceptibles d'accroître la flexibilité de gestion d'ensemble des colis ; (iv) à l'inverse, elles conduiraient à anticiper des transports entre le site de La Hague et le centre de stockage, pour une même date de mise en stockage. Les échanges avec les parties prenantes du projet Cigéo ont conduit à exclure cette option des études et recherches (voir le chapitre 1).

5.2 Besoins en capacités supplémentaires d'entreposage de déchets MAVL

Le recensement des besoins en nouvelles capacités d'entreposage pour les principales familles de colis de déchets MAVL est présenté dans la suite par site de conditionnement (La Hague, Marcoule, Cadarache, Valduc et le projet ICEDA sur le site de Bugey). Il est suivi d'un bilan d'ensemble.

5.2.1 Déchets MAVL conditionnés sur le site de La Hague (Areva)

Déchets de structure compactés (CSD-C - F2-3-02)

Le chapitre 3 montre la nécessité d'une nouvelle capacité d'entreposage de colis de déchets MAVL compactés produits à La Hague[119] (CSD-C, famille F2-3-02), afin de gérer les productions de colis après 2025. L'extension de l'ECC prévue par Areva à l'horizon 2022 répondra à ce besoin.

La question du lieu de mise en conteneur de stockage des colis CSD-C est comparable aux colis CSD-V. Réaliser cette opération dans les ateliers nucléaires du centre de stockage devrait faciliter les transports. Ces derniers pourront alors utiliser des moyens existants. Le PIGD prévoit ainsi une expédition des colis primaires au moyen d'emballages de transport de type TN843 de capacité unitaire de 35 ou 36 CSD-C, à partir de l'atelier DRV de La Hague ou de DE/EDS.

Les simulations exploratoires présentées en 2009 envisageaient des flux de désentreposage de l'ordre de 800 à 1 100 colis CSD-C par an à partir de 2030 (150 à 200 $m^3.an^{-1}$) en fonction de la CDE de l'ECC. Le Tableau 5.2-1 et la Figure 5.2-1 présentent à titre illustratif des flux de désentreposage évalués en 2012 sur la base du PIGD.

Tableau 5.2-1 Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des CSD-C sur la période 2025-2050, évalués à partir du PIGD (2012)

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031 à 2043	2044 à 2050
Nombre de colis de déchets CSD-C expédiés par période	148	271	394	518	641	764	800 x 13	1 000 x 7
Flux d'emballages TN843 expédiés chaque année	*5*	*8*	*11*	*15*	*19*	*22*	*23*	*29*
Nombre cumulé de colis de déchets CSD-C mis en stockage	148	419	813	1 331	1 972	2 736	13 136	20 136

[119] Un flux de production de colis supérieur aux estimations de l'Inventaire national à partir de 2010 anticiperait le besoin en nouvelle capacité d'entreposage.

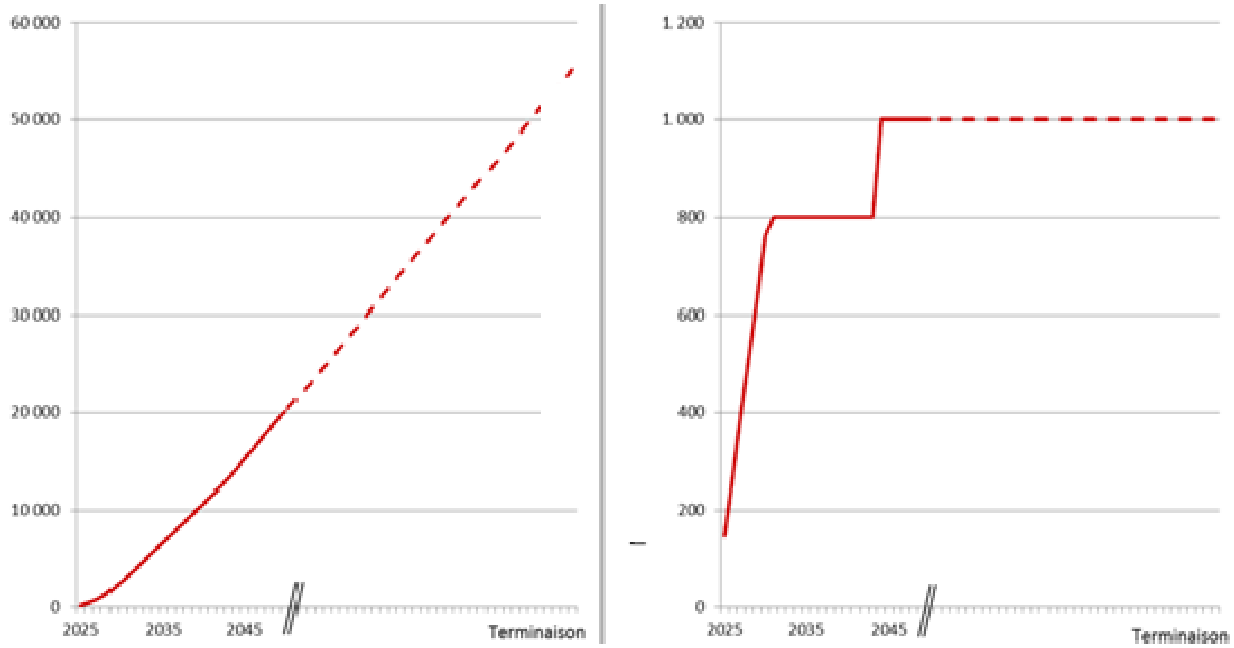


Figure 5.2-1 Illustration du désentreposage des CSD-C sur la base du PIGD (2012) : nombre cumulé de colis primaires de déchets à gauche ; flux annuel de colis primaires à droite

Le chapitre 4 a souligné l'intérêt d'un mode de désentreposage et d'expédition privilégiant des colis de déchets anciens plutôt que des colis récemment produits (exploitation de type FIFO[120]).

La nouvelle capacité à ajouter à l'ECC devra être ajustée aux perspectives de production et au scénario de désentreposage et de mise en stockage. Sans préjudice des études à venir en matière d'optimisation globale du système entreposage-transport-stockage, on peut estimer sur la base du PIGD que cette capacité supplémentaire devrait être d'au moins 3 000 colis[121] à l'échéance 2030 et de l'ordre de 10 000 colis à l'échéance 2050.

<u>Déchets solides cimentés, résidus issus d'effluents liquides</u>

Un échéancier de mise en stockage des colis entreposés dans EDS et dans les bâtiments S et ES compatible avec leur cessation définitive d'exploitation évitera de créer de nouveaux entrepôts pour accueillir ces colis (sauf potentiellement la famille F2-3-10, voir infra).

Dans le recensement des besoins présenté en 2009, le placement des colis MAVL de La Hague en conteneurs de stockage était envisagé a priori dans les ateliers nucléaires du centre de stockage. En effet certains de ces colis se caractérisent par un volume défavorable au transport. Pour d'autres, des moyens de transport de colis primaires ont d'ores et déjà été développés. Une confirmation de cette stratégie devrait néanmoins être effectuée au cas par cas.

Le PIGD prévoit le transport des colis primaires d'enrobés bitumineux et de boues séchées et compactées depuis La Hague (F2-3-04, F2-3-04, F2-3-12) en emballages de type TN833 et des colis CAC et CBF-C'2 (F2-3-07 et F2-3-08) en TN837 (respectivement à partir des ateliers DE/EB et DE/EDS). L'expédition des colis primaires de coques et embouts cimentés (F2-3-01) et de déchets de procédé cimentés (F2-3-13) nécessitera la définition d'emballages spécifiques.

[120] First in first out
[121] sans préjudice de l'entreposage de CSD-C étrangers en attente d'expédition.

Des évaluations des flux résultant du PIGD sont données à titre illustratif par le Tableau 5.2-2, le Tableau 5.2-3 et la Figure 5.2-2. Ces évaluations ne préjugent pas du travail à poursuivre pour optimiser la charge industrielle de Cigéo au cours du temps et l'utilisation des capacités d'entreposage et de transport.

Tableau 5.2-2 Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des colis d'enrobés bitumineux des familles F2-3-04 et F2-3-05, évalués à partir du scénario de référence du PIGD (2012).

	2025 à 2030	2031 à 2040	2041 à 2042	2043	2044 à 2050
Nombre de colis d'enrobés bitumineux expédiés par période	0	815 x 10	1363 x 2	1364	0
Flux d'emballages TN833 expédiés chaque année	*0*	*68*	*114*	*114*	*0*
Nombre cumulé de colis d'enrobés bitumineux expédiés	0	815 à 8 150	9 514 à 10 876	12 240	12 240
Volume cumulé de colis d'enrobés bitumineux mis en stockage (m^3)	0	181 à 1 810	2 112 à 2 415	2 717	2 717

Tableau 5.2-3 Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des colis de déchets solides cimentés sur la période 2025-2050, évalués à partir du PIGD (2012)

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031 à 2036	2037 à 2038	2039	2040 à 2043	2044 à 2050
Nombre de colis CBF-C'2/CAC expédiés chaque année	37	68	99	129	160	191	200	200	200	200	250
Flux d'emballages TN837 expédiés chaque année	*13*	*23*	*33*	*43*	*54*	*64*	*67*	*67*	*67*	*67*	*84*
Nombre cumulé de colis CBF-C'2/CAC expédiés	37	105	204	333	493	684	1 884	2 284	2 484	3 284	5 034
Volume cumulé de colis CBF-C'2/CAC expédiés (m^3)	44	124	241	393	582	807	2 223	2 695	2 931	3 875	5 940
Nb de colis de coques et embouts cimentés expédiés chaque année	18	34	49	65	80	96	129	134	133	0	0
Flux d'emballages AD1 expédiés chaque année	*6*	*12*	*17*	*22*	*27*	*32*	*43*	*45*	*45*	*0*	*0*
Nombre cumulé de colis de coques et embouts cimentés expédiés	18	52	101	166	246	342	1 116	1 384	1 517	1 517	1 517
Volume cumulé de colis de coques et embouts cimentés expédiés (m^3)	27	78	152	249	369	513	1 674	2 076	2 276	2 276	2 276
Volume cumulé de colis primaires mis en stockage (m^3)	**71**	**202**	**393**	**642**	**951**	**1 320**	**3 897**	**4 771**	**5 207**	**6 151**	**8 216**

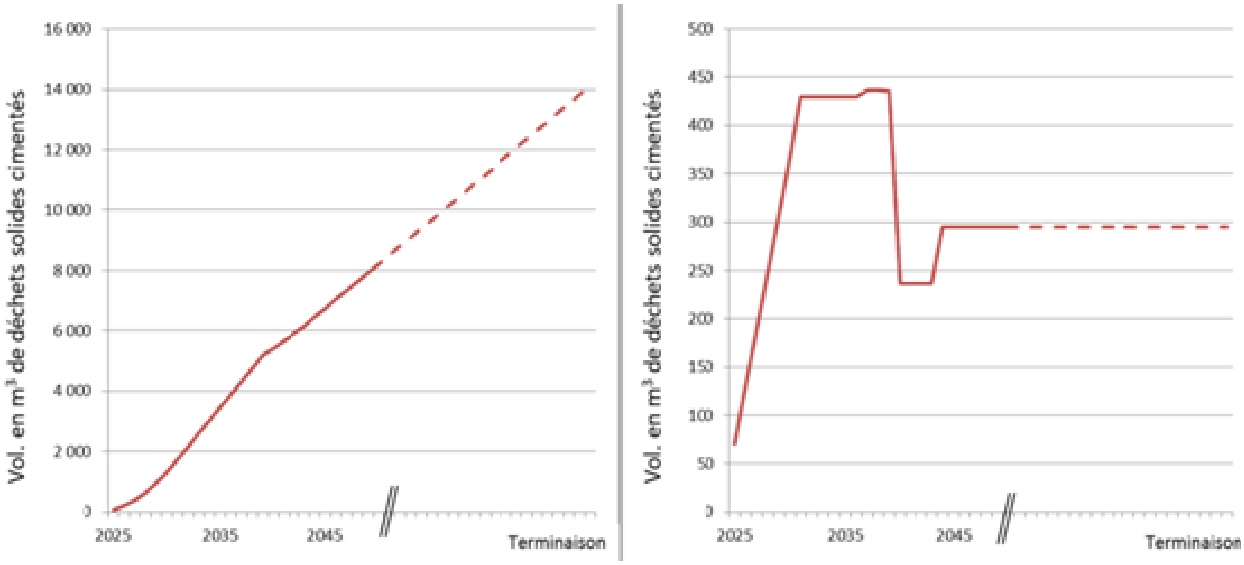


Figure 5.2-2 Illustration du désentreposage dans EDS des colis de déchets solides sur la base du PIGD (2012) : nombre cumulé de colis primaires de déchets à gauche ; flux annuel de colis primaires à droite

Déchets technologiques alpha (F2-3-10)

Dans une hypothèse de compactage, les déchets technologiques alpha de la famille F2-3-10 produiraient un débit d'hydrogène par radiolyse des matières organiques qu'il faudrait peut-être laisser décroître jusqu'à une centaine d'années avant mise en stockage.

Au terme de l'exploitation des bâtiments S et ES, il serait alors envisageable de créer une nouvelle capacité d'entreposage pour accueillir ces colis, représentant 1 025 m³. L'installation pourrait être dotée de moyens de surveillance de l'évolution des colis entreposés, en particulier leur production d'hydrogène. Pour mémoire un conditionnement alternatif au compactage fait l'objet d'études de R&D.

5.2.2 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Marcoule (CEA)

Le chapitre 3 a montré la nécessité de disposer de capacités d'entreposage supplémentaires pour gérer les enrobés bitumineux extraits des casemates de Marcoule à partir de 2017, ainsi que les colis issus de la reprise et du conditionnement de déchets anciens aujourd'hui entreposés sous forme non conditionnée. Avec les hypothèses de mise en stockage du PIGD (chapitre 4), le besoin correspondant peut être estimé aujourd'hui[122] de l'ordre de 6 000 à 7 000 m³, exprimé en volume de colis primaires. Il est à noter que cette estimation ne couvre pas les colis de déchets rattachés à la catégorie FAVL qui seront également à prendre en charge.

Par ailleurs, le projet DIADEM du CEA vise à gérer sur le site de Marcoule les déchets irradiants ou alpha et de démantèlement.

Enrobés bitumineux (familles F2-4-03 et F2-4-04)

Le recensement des besoins en entreposage effectué en 2009 soulignait l'intérêt d'étudier l'option d'une mise en conteneur de stockage, sur le site de Marcoule, des enrobés bitumineux au fur et à mesure de leur extraction des casemates, en remplacement de la poursuite du sur-fûtage en conteneurs de 380 litres pratiqué aujourd'hui (Encadré 5.2-1).

[122] Il avait été estimé en 2009 de l'ordre de 5 000 m³.

Encadré 5.2-1 Option d'une mise en conteneur de stockage sur le site de Marcoule des enrobés bitumineux (recensement des besoins présenté en 2009)

L'option d'une mise en conteneur de stockage des enrobés bitumineux anciens extraits des casemates n° 3 à 13 sur le site de Marcoule diminue globalement le nombre de transferts et de manutentions de colis à réaliser. Pour les colis de la famille F2-4-04 non sur-fûtés au préalable en conteneurs de 380 litres, elle offre un gain très important de ressource de stockage, en diminuant (de l'ordre de 40 %) le volume final des colis de stockage. Elle minimise les dimensions extérieures du colis de stockage. Le volume et le coût de stockage sont diminués.

Cette option présente aussi un caractère favorable pour l'entreposage : elle réduit le débit de dose au pseudo contact, facilite l'empilement des colis et améliore leur tenue à la chute.

Une mise en conteneur de stockage pourrait être réalisée sur le site de Marcoule dès l'autorisation de création du centre de stockage (soit à l'horizon 2017). En effet, cela permettrait d'intégrer dans la conception définitive du conteneur les exigences provenant de la future loi fixant les conditions de la réversibilité, ainsi que les prescriptions techniques suite à l'instruction de la demande d'autorisation de création du stockage. Cependant, une telle stratégie suppose que la conception et la construction de l'atelier de conditionnement et d'expédition anticipent sur les spécifications d'acceptation des colis en stockage, qui elles aussi ne pourront être finalisées qu'après l'autorisation de création. La conception de l'atelier de conditionnement intégrerait une flexibilité suffisante pour s'adapter à des évolutions des spécifications du conteneur.

Une mise en conteneur de stockage implique d'avoir au préalable défini les objectifs de la caractérisation et du contrôle des colis primaires puis d'avoir développé les moyens correspondants. En effet le conteneur de stockage constitue un écran supplémentaire autour des déchets qui complexifie la caractérisation.

La fabrication de colis de stockage MAVL sur le site de Marcoule implique d'en étudier les modalités de transport entre ce site et le centre de stockage.

Pour ce qui concerne les enrobés bitumineux de la famille F2-4-03, deux options de gestion devraient être étudiées et comparées : un transport des colis primaires jusqu'au centre de stockage suivi d'une mise en conteneur de stockage sur ce centre, ou une mise en conteneur de stockage sur le site de Marcoule qui favoriserait une mutualisation des moyens de transport avec la famille F2-4-04 à retirer des casemates.

Par ailleurs une mutualisation des nouvelles capacités d'entreposage avec les déchets anciens à reprendre et conditionner (familles F2-4-07, F2-4-09, F2-4-10, F2-4-11) conduirait à étudier également une mise en conteneur de stockage, à Marcoule, de ces déchets (en alternative à une extension de l'EIP pour ceux prévus d'être conditionnés en fûts de 380 litres).

Le PIGD a retenu l'option d'une mise en conteneur de stockage, sur le site de Marcoule, des enrobés bitumineux extraits des casemates n° 3 à 13, l'a étendu à tous les enrobés bitumineux de Marcoule (partie de la famille F2-4-04 sur-fûtée en conteneurs de 380 litre et famille F2-4-03) et plus généralement à l'ensemble des autres colis de déchets MAVL de Marcoule, en maintenant une alternative d'expédition en colis primaires. Cela concerne 17 422 colis primaires de la famille F2-4-04 non sur-fûtés, 7 000 colis primaires de cette même famille préalablement sur-fûtés en conteneur de 380 litres, ainsi que 4 059 colis primaires de la famille F2-4-03 (seuls les colis d'enrobés bitumineux rattachés à la catégorie MAVL sont considérés ici). Chaque colis de stockage comporte quatre colis primaires. Le CEA prévoit dans son scénario de référence d'expédier les colis de stockage en emballages ISO 20' IP2 (à raison d'un colis de stockage par emballage).

Le Tableau 5.2-4 et le Tableau 5.2-5 présentent à titre illustratif des évaluations de flux fondées sur des hypothèses préliminaires[123] ne préjugeant pas du travail d'optimisation à venir.

D'autres scénarios demanderont aussi à être évalués et comparés, comportant des expéditions sous forme de colis primaires (tous les colis concernés de la famille F2-4-04 étant alors sur-fûtés). Le CEA envisage dans ce cas l'utilisation d'emballages de transport de type B tels que les modèles TN833 ou RD39, à partir de l'EIP.

Le CEA étudie la création d'une installation d'attente d'évacuation (IAE) à Marcoule, dans laquelle seraient placés temporairement les colis issus de la reprise des casemates ainsi que de la reprise et du conditionnement des déchets (voir infra), notamment ceux produits entre 2017 et 2025 ou 2030. L'introduction des colis dans l'IAE s'effectuerait sous forme de colis de stockage, élaborés dans le futur atelier ACE[124] (CCS[125]). La mise en service de l'IAE et de l'ACE est envisagée à l'horizon 2017. L'expédition des colis en emballages ISO 20' s'effectuerait à partir de ces ateliers.

Alternativement, en complément ou en remplacement de l'IAE, des scénarios d'extension de l'EIP demanderont à être étudiés.

Tableau 5.2-4 Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des fûts d'enrobés bitumineux MAVL retirés des casemates d'entreposage de Marcoule à partir de 2017 et reconditionnés directement en conteneur de stockage, évalués à partir du PIGD (2012)[126]

Scénario de référence	2025 à 2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035 à 2040	2041	A partir de 2042
Nombre de fûts d'enrobés bitumineux expédiés chaque année	0	1 433	1 500	1 517	1 500	1 550	1 500	922	0
Flux d'emballages ISO 20'	0	359	375	379	375	388	375	230	0

Scénario optionnel	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031 à 2033	2034	2035 à 2038	2039	A partir de 2040
Nombre de fûts d'enrobés bitumineux MAVL expédiés chaque année	277	508	740	971	1 202	1 433	1 500	1 567	1 500	224	0
Flux d'emballage ISO 20' IP2	70	127	185	243	301	359	375	392	375	56	0

[123] Le PIGD envisage de commencer l'expédition vers Cigéo des colis d'enrobés bitumineux de Marcoule par une partie de la famille F2-4-04. A l'horizon 2030, le PIGD, prévoit que 14 000 à 17 500 colis de déchets primaires auront été expédiés. L'expédition des colis de la famille F2-4-03 est supposée ici effectuée dans la continuité.

[124] Atelier de conditionnement et d'expédition

[125] Unité de conditionnement en conteneur de stockage

Tableau 5.2-5 Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des fûts d'enrobés bitumineux MAVL produits par la STEL depuis 1995 et des fûts d'enrobés placés en sur-fûts de 380 litres, évalués à partir du PIGD (2012)[126]

Scénario de référence	2025 à 2040	2041	2042 à 2045	2046	2047 à 2049	2050
Nombre de colis primaires d'enrobés bitumineux MAVL expédiés par période	0	578	1 500 x 4	1 200	900 x 3	581
Flux d'emballages ISO 20' IP2	*0*	*145*	*375 x 4*	*300*	*225 x 3*	*146*

Scénario optionnel	2025 à 2038	2039	2040	2041 à 2045	2046	2047 à 2050
Nombre de colis primaires d'enrobés bitumineux MAVL expédiés par période	0	1 276	1 500	1 500 x 5	783	0
Flux d'emballages ISO 20' IP2	*0*	*319*	*375*	*375 x 5*	*196*	*0*

Reprise et conditionnement de déchets anciens (familles F2-4-07, F2-4-09, F2-4-10, F2-4-11, F2-4-15 et pour partie F2-4-14)

Pour les déchets métalliques et organiques, solides ou pulvérulents, actuellement entreposés à Marcoule sous forme non conditionnée, un conditionnement primaire en fût en acier inoxydable de 380 litres est prévu par le CEA, à l'exception des familles F2-4-09 et F2-4-15 (voir le chapitre 2). A ces déchets s'ajouteront ultérieurement ceux de la future station de traitement des effluents de Marcoule, conditionnés de la même manière (F2-4-14). Cet ensemble de déchets représente un nombre total de colis primaires à terminaison de 30 945.

Le PIGD prévoit que tous ces colis primaires seront placés à Marcoule en conteneur de stockage, avant entreposage et/ou expédition vers Cigéo. A l'instar des enrobés bitumineux, le CEA envisage un transport des colis de stockage en emballage ISO 20' de type IP2. La compatibilité de ce mode de transport avec la réglementation demande à être confirmée en tenant compte des caractéristiques de l'ensemble des déchets considérés. Alternativement une expédition sous la forme de colis primaires est aussi considérée, associée à des transports de type B.

Le Tableau 5.2-6 présente à titre illustratif des évaluations de flux d'expédition vers Cigéo fondées sur des hypothèses préliminaires concernant l'ordonnancement des différentes familles. Les colis d'aiguilles de barres de commande des réacteurs à neutrons rapides (famille F2-4-15) constituent un cas particulier : le faible volume conditionné qu'ils représentent (13 m^3) ne serait expédié qu'à l'horizon 2049 en attendant la décroissance des produits d'activation irradiants.

[126] Les détails des flux d'expédition sont présentés ici à titre indicatif.

Tableau 5.2-6 Flux possibles d'expédition vers Cigéo des colis issus de la reprise et du conditionnement de déchets anciens, estimés à partir du scénario de référence du PIGD (2012)

	2025-2030	2031	2032	2033	2034	2035 à 2040	2041	2042	2043	2044 à 2047	2048	2049	A partir de 2050
Nombre de colis primaires de déchets issus de la RCD en conteneurs 380 litres expédiés chaque année	0	410	410	450	410	410	450	410	416	150	0	40	0
Nombre de colis primaires de déchets de structure magnésiens expédiés chaque année	0	575	575	575	575	575	575	575	564	0	0	0	0
Nombre de colis primaires d'aiguilles de barres de commande RNR expédiés chaque année	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
Flux d'emballages ISO 20' IP2	0	247	247	257	246	247	257	247	245	38	0	12	0

Déchets technologiques et effluents de rinçage vitrifiés de l'AVM (familles F2-4-05 et F2-4-13)

Ces colis sont produits dans l'AVM et entreposés au SVM (chapitre 3). Un échéancier de mise en stockage compatible avec la mise à l'arrêt future de l'installation évitera de susciter un nouveau besoin d'entreposage. Le PIGD envisage une mise en conteneur de stockage à Marcoule et un transport dans les mêmes conditions que les colis issus de la reprise et du conditionnement de déchets anciens.

Toutefois le chapitre 4 évoque l'intérêt d'un stockage des déchets MAVL vitrifiés dans des alvéoles dédiés. Le volume total limité des déchets MAVL vitrifiés suggère de chercher à regrouper dans le temps la mise en stockage de l'ensemble de ces déchets. Le cas échéant, cette option pourrait induire un besoin d'entreposage supplémentaire (typiquement d'une vingtaine d'années) de la famille F2-4-13 après la mise à l'arrêt définitif de l'AVM. Cela ne concernerait que 166 colis primaires, soit un volume de 30 m^3 ([127]).

Déchets irradiants ou alpha et de démantèlement (familles F2-4-12 et pour partie F2-4-14)

Le CEA prévoit de commencer en 2013 la construction à Marcoule de l'installation d'entreposage DIADEM[128], pour une mise en service fin 2016.

Les colis de déchets y seront empilés dans 252 puits verticaux constitués de guides verticaux et d'un amortisseur de chute en partie basse. Ces puits seront disposés dans un alvéole en béton armé avec une dalle supérieure assurant la radioprotection. La ventilation par circulation transversale de l'air dans l'alvéole est mécanique avec filtration. Les manutentions seront effectuées sous hotte blindée et tiroir à opercule dans un hall supérieur qui est équipé d'un pont portique et qui reste accessible aux opérateurs pendant les manutentions.

L'installation DIADEM assurera une complémentarité avec l'installation CEDRA de Cadarache (voir le chapitre 3) : il s'agira d'y gérer des colis de déchets dont le débit de dose ou le contenu en émetteurs alpha ou en matières fissiles ne permettent pas une prise en charge dans CEDRA. La conception de l'installation est compatible avec un débit de dose au pseudo contact des colis pouvant atteindre 680 $Gy.h^{-1}$.et avec une activité alpha par colis pouvant dépasser 185 GBq.

[127] Le recensement des besoins présenté en 2009 suggérait d'étudier la possibilité d'effectuer cet entreposage sur le centre de stockage. Cette option n'est plus considérée dans les études et recherches.
[128] Entreposage de déchets irradiants ou alpha et de démantèlement

Sa capacité totale de 2 004 colis de déchets est décomposée dans le Tableau 5.2-7, en fonction des trois types de conteneur qui seront utilisés pour entreposer les déchets : colis DIADEM, colis ½ DIADEM et colis A4 qui sont cylindriques, de même diamètre mais de hauteurs différentes.

Tableau 5.2-7 Capacité d'entreposage du projet DIADEM

	Volume unitaire en m³	Nombre de places pour colis de déchets	Volume disponible en m³
Colis en conteneur DIADEM	0,206	1 342	277
Colis de déchets en conteneur ½ DIADEM	0,100	465	47
Colis de déchets A4	0,410	197	81
Total		**2 004**	**405**

Le volume total de déchets à entreposer dans DIADEM est estimé à 397 m³ ([129]). Il s'agit pour l'essentiel de productions à venir au rythme du démantèlement d'installations. La capacité d'entreposage de DIADEM sera aussi utilisée transitoirement par le CEA pour gérer certains déchets FMA-VC pendant leur décroissance radioactive avant expédition vers le Centre de stockage de l'Aube.

5.2.3 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Cadarache (CEA)

Déchets dits faiblement irradiants (familles F2-5-02, F2-5-03, F2-5-04, F2-5-06, F2-6-02)

Au vu des perspectives de production de nouveaux colis, les capacités d'entreposage disponibles de CEDRA et de ses extensions, en relai de l'INB 56, seront suffisantes pour assurer la gestion des déchets faiblement irradiants de Cadarache (voir le chapitre 3) ; elles offrent a priori des marges vis-à-vis du rythme d'expédition vers Cigéo.

Le PIGD envisage l'expédition de premiers colis de déchets MAVL faiblement irradiants vers Cigéo à partir de 2043, cette expédition se poursuivant au-delà de 2050. Le Tableau 5.2-8 et la Figure 5.2-3 présentent à titre indicatif un scénario possible d'ordonnancement des différentes familles sur la période 2025-2050 ; ce scénario est défini sur la base du PIGD de façon à avoir terminé dès 2050 l'expédition de productions minoritaires qui sont aujourd'hui achevées : colis de déchets solides cimentés en conteneur béton de 1 000 litres ou de 1 800 litres et colis en conteneurs acier contenant en fût de 700 litres de concentrats cimentés. Ces hypothèses ne préjugent pas de la poursuite des travaux dans une optique d'optimisation globale.

En matière de transport vers Cigéo, le PIGD prévoit l'utilisation de l'emballage de type RD39 pour les colis en conteneurs béton de 500 litres (F2-5-02), expédiés à raison de 5 colis de déchets par emballage. Des emballages de transport seront à définir pour les autres familles de colis de déchets.

[129] Outre les familles F2-4-12 et pour partie F2-4-14 déclarées dans l'IN2012, ce volume recouvre des conteneurs de déchets divers issus de l'exploitation, de l'assainissement et du démantèlement d'installations du Centre CEA de Grenoble (DIV2), des sources scellées usagées (SO1), des déchets produits au-delà de 2030.

Tableau 5.2-8 Flux possibles de désentreposage et d'expédition vers Cigéo des colis de déchets MAVL faiblement irradiants sur la période 2025-2050, évalués à partir du PIGD (2012)

	2025 à 2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Nombre de colis de déchets de 870 litres expédiés chaque année (F2-5-04)	0	13	120	162	240	240	440	463	515
Nombre de colis de concentrats de 700 litres expédiés chaque année (F2-5-03)	0	15	25	0	0	0	0	0	0
Flux d'emballages de transport expédiés chaque année	*0*	*7*	*37*	*41*	*60*	*60*	*110*	*116*	*129*
Nombre de colis de déchets en conteneurs béton 500 litres expédiés chaque année (F2-5-02)	0	0	214	210	210	393	210	210	210
Flux d'emballages de transport expédiés chaque année/an	*0*	*0*	*43*	*42*	*42*	*79*	*42*	*42*	*42*
Nombre de colis de déchets en conteneurs béton 1000 et 1800 litres (F2-5-06)	0	0	0	0	180	88	0	0	0
Flux d'emballages de transport expédiés chaque année	0	0	0	0	*90*	*44*	0	0	0
Nombre de fûts de boues concentrats cimentés expédiés chaque année (F2-6-02)	0	0	0	0	0	120	120	120	120
Flux d'emballages de transport expédiés chaque année	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*10*	*10*	*10*	*10*
Volume total cumulé de colis de déchets mis en stockage (m³)	**0**	**28**	**269**	**516**	**1 171**	**1 772**	**2 295**	**2 837**	**3 425**

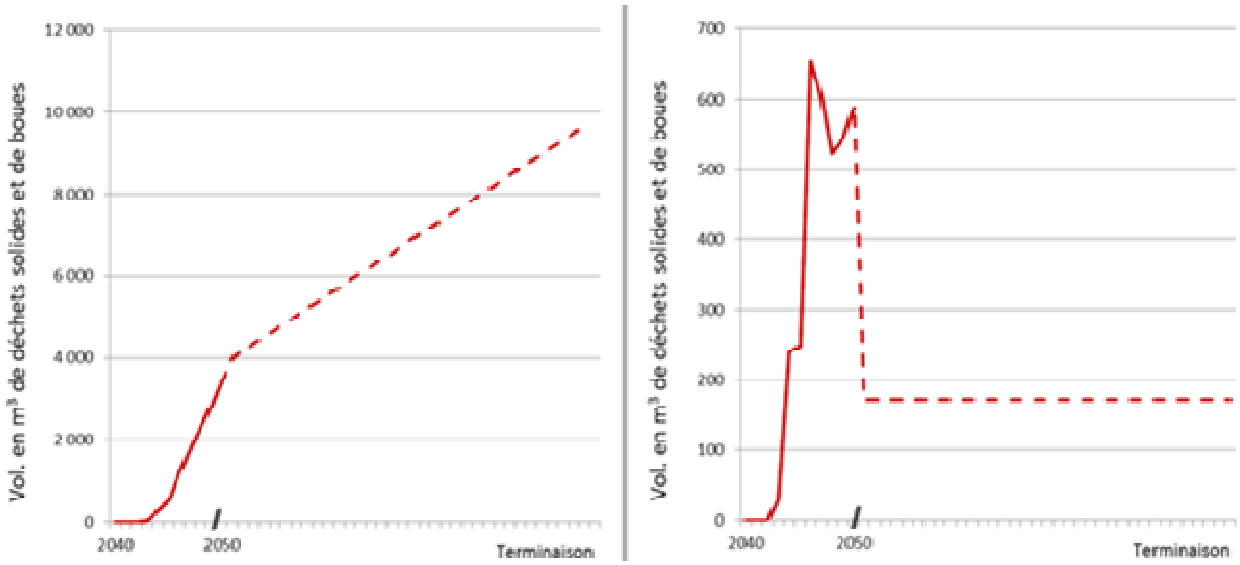


Figure 5.2-3 Illustration du désentreposage des colis de déchets MAVL faiblement irradiants (CEDRA FI), sur la base du PIGD (2012) : nombre cumulé de colis primaires de déchets à gauche ; flux annuel de colis primaires à droite

<u>Déchets dits moyennement irradiants (famille F2-5-05)</u>

Globalement les capacités d'entreposage disponibles et celle de l'extension prévue de CEDRA permettront de gérer les colis de déchets moyennement irradiants sur le site de Cadarache.

Le PIGD envisage l'expédition vers Cigéo de premiers colis de déchets moyennement irradiants à partir de 2047 (concomitamment avec la famille F2-5-06). Dans le cadre de la poursuite des études visant à une optimisation globale, on pourra examiner la possibilité d'anticiper l'expédition de la famille F2-5-05 par rapport aux colis FI, au regard de l'utilisation des capacités d'entreposage. L'emballage de transport sera à définir.

Sulfates de plomb radifères, blocs sources (familles F2-5-01 et F2-9-01)

Le PIGD planifie l'expédition des colis de sulfates de plomb radifères et de blocs sources entre 2030 et 2050 de façon concomitante aux colis MAVL de l'AVM (Marcoule). Un scénario possible consisterait en l'expédition vers Cigéo des colis de sulfates de plomb radifères entre 2033 et 2049, suivie en 2050 de l'expédition des colis de blocs sources[130]. L'échéancier d'expédition de ces colis pose la question de la durée de poursuite de leur entreposage dans l'INB56, ou celle d'un éventuel transfert dans un autre entrepôt (ces colis représentent un volume total de 582 m^3). Cette question s'inscrit dans la suite des études visant à une optimisation d'ensemble du système entreposage-transport-stockage.

Le PIGD prévoit le transport des conteneurs béton de 5 m^3 contenant des fûts de sulfate de plomb radifère en emballage de type RD39, les autres emballages étant à définir.

5.2.4 Déchets MAVL conditionnés sur le site de Valduc (CEA)

Le PIGD prévoit l'expédition vers Cigéo des colis d'effluents MAVL vitrifiés (F2-6-03) depuis le site de Valduc à partir de 2030, concomitamment avec des colis de déchets provenant d'autres sites. La capacité d'entreposage sur le site de Valduc pourra être adaptée à l'ordonnancement des expéditions. Le CEA envisage le transport vers Cigéo en emballage de type B TN28.

Les autres déchets de Valduc sont prévus d'être entreposés à Cadarache.

Les déchets de déconstruction à produire au-delà de 2030, conditionnés en conteneurs de 870 litres, pourront nécessiter une capacité d'entreposage spécifique, à définir en fonction du rythme d'expédition.

5.2.5 Déchets MAVL d'exploitation et de déconstruction des réacteurs électronucléaires (EDF)

Sur le site de Bugey, EDF prévoit actuellement de mettre en service ICEDA[131] en 2015, pour une durée prévisionnelle d'exploitation de 50 ans. L'installation en cours de construction comportera deux halls d'entreposage ventilés[132], chacun ayant une capacité de 2 000 m^3 environ. Les colis y seront empilés sur 3 niveaux suivant une disposition pyramidale à trame triangulaire. Les manutentions seront réalisées par télé-opération (Figure 5.2-4).

Tous les colis de la famille F2-2-03 seront entreposés dans ICEDA jusqu'à leur expédition vers Cigéo. Ils représenteront au final un volume total de 3 800 m^3. Le PIGD prévoit cette expédition au-delà de 2050. L'emballage de transport qui pourra être utilisé sera à définir. EDF prévoit aussi d'entreposer transitoirement dans ICEDA des déchets FMA-VC et FAVL issus du démantèlement de réacteurs de différentes filières.

[130] L'hypothèse sous-tendant ce scénario est une expédition prioritaire des déchets de Marcoule en vue de la mise à l'arrêt définitif du SVM.
[131] Installation de conditionnement et d'entreposage de déchets activés
[132] La ventilation nucléaire des deux halls d'entreposage sera équipée en sortie d'un filtre de très haute efficacité.

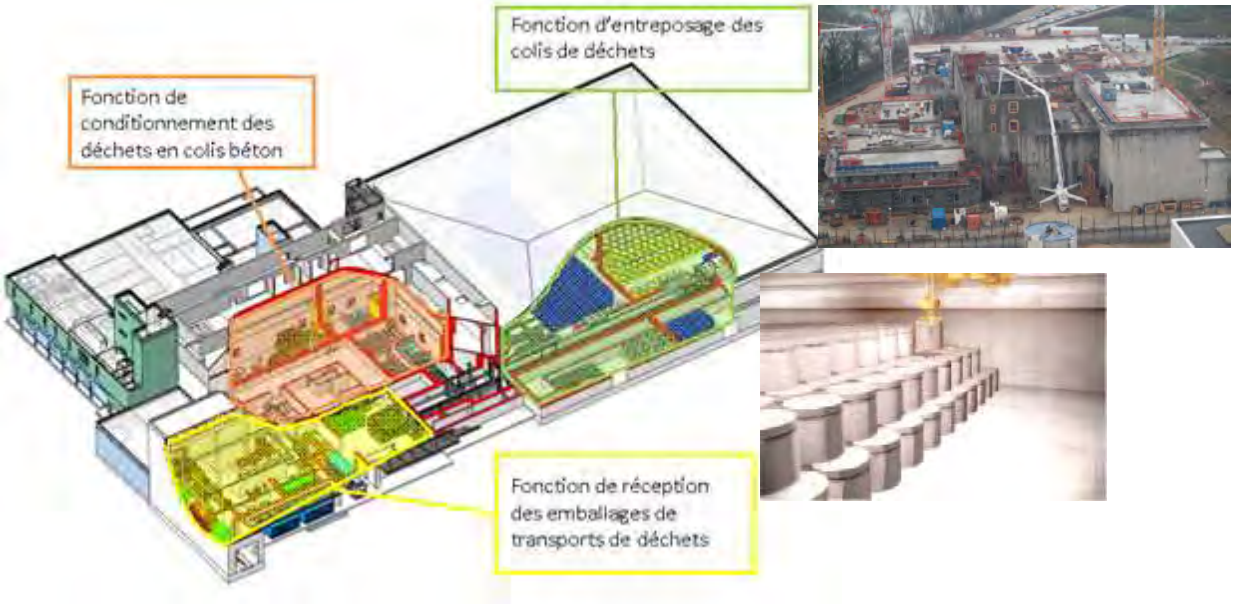


Figure 5.2-4 Vues de principe du projet ICEDA et photographie du chantier au 21 décembre 2011 (source EDF)

5.2.6 Bilan des besoins en nouvelles capacités d'entreposage pour les colis de déchets MAVL

En complément aux entrepôts existants, les créations et extensions d'installations en construction ou en projet par Areva, le CEA et EDF d'ici 2025 permettront de répondre, en termes de capacités et de durées, aux besoins d'entreposage liés aux colis de déchets MAVL.

Les projets correspondants sont, à court terme, la création de l'installation DIADEM à Marcoule et de l'installation ICEDA sur le site de Bugey, et dans les années 2020-2025 l'extension de CEDRA à Cadarache et de l'ECC à La Hague.

Il s'y ajoute d'ici à l'horizon 2017 la nécessité de disposer de nouvelles capacités d'entreposage pour les colis d'enrobés bitumineux et de déchets anciens repris et conditionnés à Marcoule (extension de l'EIP et/ou création de l'IAE).

Par ailleurs, une capacité d'entreposage limitée sera nécessaire sur le site de Valduc pour entreposer les futurs effluents MAVL vitrifiés.

Les hypothèses et données de l'Inventaire national ne conduisent pas à identifier de nouveaux besoins pour les déchets MAVL dans la décennie 2025-2035.

A l'instar des déchets HA, le recensement des besoins en entreposage qui avait été présenté en 2009 posait la question d'une création éventuelle de capacités d'entreposage en soutien à la réversibilité. Il s'agirait en tout état de cause de capacités limitées, toute opération hypothétique de récupération d'un grand nombre de colis étant précédée de la réalisation des moyens de gestion de ces colis (voir le chapitre 4). La question renvoie a priori à l'horizon 2040-2050, à partir duquel il ne devrait plus exister d'entrepôt préexistant capable de prendre en charge certaines familles de colis de déchets MAVL déjà stockées.

Pour mémoire, la question de la localisation d'une capacité d'entreposage sur le site de stockage à partir de 2040 était aussi évoquée en lien avec la précédente. Outre le soutien à la réversibilité, une telle capacité pourrait favoriser une mutualisation des besoins entre familles MAVL diverses, et avec les déchets HA, tout en optimisant les transports ; cette mutualisation se justifierait particulièrement dans le cas de familles représentant des volumes limités, dans l'attente de la création d'alvéoles de stockage aptes à les accueillir.

Comme pour les déchets HA, cette option est désormais limitée à la fonction de tampon d'exploitation (voir le chapitre 1). De plus une capacité très limitée d'entreposage, située dans les ateliers nucléaires de surface ou dans l'installation souterraine de Cigéo, pourra être consacrée à la surveillance de l'évolution de colis de déchets témoins, prélevés parmi ceux livrés sur le centre avant leur mise en stockage.

5.3 Fonctionnalités de l'entreposage et objectifs de sûreté

Les fonctions principales de l'entreposage de colis de déchets HA ou MAVL sont d'accueillir ces colis, de les conserver pendant la durée prévue puis de les reprendre à l'issue de cette durée. Elles impliquent une gestion des connaissances de ces colis et des actions de surveillance. Ces objectifs fonctionnels doivent être atteints dans le respect des objectifs de sûreté et de radioprotection, conférant aux installations des fonctions de sûreté.

Cette section identifie les fonctionnalités et objectifs de sûreté qui ont été pris en compte dans le cadre des études et recherches menées depuis 2007.

5.3.1 Fonctions de service

Accueil et reprise de colis de déchets HA ou MAVL

Le recensement des besoins en nouvelles capacités d'entreposage montre l'intérêt pour certaines installations futures de pouvoir accueillir des colis de stockage. Sur la base du PIGD, c'est le cas de capacités à créer pour les colis d'enrobés bitumineux (famille F2-4-04) et pour des colis issus de la reprise et du conditionnement de déchets anciens (F2-4-07, F2-4-09, F2-4-10, F2-4-11, F2-4-15 et pour partie F2-4-14).

Par ailleurs la réversibilité conduit à envisager l'hypothèse d'entrepôts futurs qui accueilleraient des colis de déchets récupérés du stockage, ces derniers pouvant alors se trouver sous la forme de colis de stockage ou de colis primaires.

Une installation d'entreposage qui serait capable d'accueillir à la fois ou successivement des colis primaires de déchets et des colis de stockage constituerait un soutien potentiel à la réversibilité du stockage.

Qu'il s'agisse d'accueillir des colis primaires seuls, des colis de stockage seuls, ou les deux, il peut apparaître dans certains cas l'intérêt d'une mutualisation de capacités entre plusieurs familles, HA ou MAVL, voire HA et MAVL.

A tout moment en situation normale de fonctionnement[133], la reprise doit rester possible pour tous les colis, quelle que soit la durée pendant laquelle ils ont été conservés dans l'installation, en utilisant les moyens normaux d'exploitation.

Les futurs besoins en entreposage varient de quelques dizaines à plusieurs milliers de mètres-cubes. Si les petits volumes suggèrent une recherche de mutualisation d'installations, les grands volumes peuvent conduire à un découpage en modules successifs de capacité plus limitée, mis en exploitation au fur et à mesure de la production de nouveau colis (ou de leur récupération éventuelle dans le cadre de la réversibilité). Outre un étalement des investissements à réaliser, la modularité offre une souplesse d'adaptation aux incertitudes et aléas en matière de productions futures et de gestion des déchets.

La juxtaposition de modules dans une même installation évite la multiplication d'équipements qui peuvent être mis en commun (notamment pour la manutention des colis) et limite les coûts d'exploitation.

[133] Pour les cas possibles d'incident ou d'accident avec dégradation éventuelle du confinement, les systèmes qui seraient mis en œuvre pour reprendre les substances radioactives et limiter les conséquences de l'accident doivent être envisagés dès la conception des installations d'entreposage, ainsi que les conditions de leur intégration dans les installations.

Conservation des colis

La durée de conservation des colis dépend, comme les flux entrant et sortant, des scénarios de stockage et d'entreposage. Selon les cas, elle peut varier d'une vingtaine d'années à un siècle.

D'une manière générale, les conditions d'entreposage doivent maintenir les colis, sur cette durée, dans un état aussi proche que possible de celui qu'ils présentaient en entrée. Il s'agit d'une part de pérenniser leur aptitude à être manutentionnés et leur contribution aux fonctions de sûreté de l'entreposage. D'autre part les caractéristiques des colis qui seraient mobilisées ultérieurement, notamment pour les fonctions de sûreté du stockage, doivent être préservées. Cela impose de limiter les températures atteintes dans les colis (voir infra, § 1.3.2.1) ainsi que les charges mécaniques appliquées, et de maintenir des conditions d'environnement physico-chimiques favorables aux matériaux (notamment le béton, l'acier inoxydable ou l'acier non ou peu allié des conteneurs).

L'analyse phénoménologique montre que la durabilité des matériaux passe en général par la recherche d'une faible hygrométrie atmosphérique (cf. chapitre 8). Pour conserver une atmosphère sèche au contact des colis, les objectifs suivants de degré d'hygrométrie ont été recherchés dans le cadre des études présentées aux chapitres 6 et 7 :

- 50 % à 60 % de l'humidité relative (HR) en conditions nominales ;
- 70 % de l'humidité relative (HR) en conditions accidentelles et climatiques extrêmes.

La durée d'exploitation des entrepôts détermine les exigences sur la durabilité des structures d'entreposage. Le recensement des besoins montre qu'une durabilité jusqu'à un siècle environ apporte de la flexibilité à la gestion des colis de déchets et favorise la complémentarité de l'entreposage avec le stockage.

Cela renvoie aux dimensionnements et aux choix des matériaux, et conduit à placer autant que possible les structures sensibles en atmosphère sèche (cf. chapitre 8).

De plus, une durabilité séculaire, située à la limite du savoir-faire industriel actuel, suggère la mise en place d'actions de surveillance des structures et des colis (voir ci-dessous).

Gestion des connaissances des colis

Les objectifs fonctionnels de l'entreposage vont de pair avec l'acquisition et le maintien d'une connaissance adéquate des colis entreposés pendant toute la période de conservation. Cette gestion des connaissances doit permettre de vérifier leur conformité aux spécifications d'acceptation en entreposage et ainsi de s'assurer qu'ils peuvent être manutentionnés et réaliser les fonctions de sûreté auxquelles ils contribuent. Elle anticipe aussi sur les besoins des étapes suivantes de la gestion des colis, en particulier leur stockage.

L'acquisition des connaissances sur les colis passe par le contrôle (documentaire et physique) en entrée et par la surveillance dans l'entreposage (voir infra).

Au plan opérationnel, une bonne pratique en matière de gestion des connaissances des colis suppose :

- la traçabilité de l'entrée d'un colis en entreposage, de sa localisation ou de ses localisations successives et de sa sortie. De cette façon, l'inventaire des colis entreposés est tenu à jour en permanence. Cette traçabilité englobe également les transformations ou reconditionnements que certains colis pourraient être amenés à subir au cours de leur entreposage ;
- la lecture sur chaque colis d'un identifiant dont la pérennité sur la période d'entreposage devra être assurée. De cette façon, le lien entre l'objet et les fichiers de données fournies par le producteur du colis, par sa gestion en entreposage, par d'éventuels contrôles en entrée puis en cours d'entreposage, enfin en sortie de celui-ci, pourra être maintenu.

Surveillance

La surveillance des installations nucléaires s'inscrit dans l'approche de sûreté de prévention et de protection vis-à-vis des incidents ou accidents d'exploitation. L'objectif de cette surveillance est d'assurer le maintien de l'installation dans le domaine de fonctionnement autorisé. La surveillance doit permettre d'alerter l'exploitant dès que les grandeurs surveillées sortent du domaine de fonctionnement normal spécifié. Ces alertes conduisent alors à des mesures correctives pour se maintenir dans le domaine autorisé.

Cette approche est évidemment applicable aux installations d'entreposage. En complément, les objectifs de durabilité de l'entreposage et de maintien de la qualité des colis destinés au stockage peuvent étendre la surveillance aux évolutions à moyen et long terme. Cette observation vise à suivre directement ou indirectement les évolutions lentes de paramètres physiques dont les propriétés doivent être conservées sur une durée séculaire. Elle concerne à la fois les structures d'entreposage et les colis de déchets entreposés.

Une observation des structures d'entreposage permettrait de réévaluer périodiquement leur aptitude à la durabilité et de détecter le cas échéant des signaux précurseurs de vieillissement. Le vieillissement ne devra pas atteindre un niveau au-delà duquel les fonctions assignées ne sont plus assurées.

Les caractéristiques des colis à surveiller sont liées à leur contribution aux fonctions de sûreté de l'entreposage, à l'évolution éventuelle de leur aptitude à la manutention et à celle de leurs qualités en vue du stockage.

La fréquence des observations et leur répartition sur un échantillon représentatif de la population de colis entreposés dépendent de l'analyse de risques de défaillance ou d'altération des colis, et de la gravité des éventuelles conséquences radiologiques ou non radiologiques. Elles prennent également en compte les délais dans lesquels des mesures correctives pourraient être prises.

Les grandeurs surveillées peuvent être acquises à deux niveaux. Le respect du seuil surveillé peut d'abord être contrôlé de manière globale pour un groupe de colis. Il peut aussi être contrôlé de manière plus précise par auscultation individuelle, soit pour rechercher un colis défaillant, le cas échéant, soit pour conforter la validité de la surveillance par examen poussé sur un colis servant alors de témoin. Une auscultation individuelle peut nécessiter le retrait du colis de sa position d'entreposage pour effectuer des mesures dans une zone équipée et dédiée. Elle peut aussi être réalisée sur place.

Aussi la surveillance des colis s'appuie sur une accessibilité aux colis entreposés et/ou sur une facilité de leur manutention.

Le programme de surveillance des colis de déchets entreposés est élaboré dès la conception de l'installation et mis en œuvre tout au long de l'exploitation. Il s'accompagne de révisions qui tiennent compte de l'évolution des installations, du nombre et des caractéristiques des colis entreposés et du retour d'expérience.

5.3.2 Objectifs, fonctions et exigences de sûreté

Les installations d'entreposage doivent protéger le public, l'environnement et les travailleurs chargés de leur exploitation, des risques liés aux rayonnements ionisants émis par les déchets et de ceux liés à une dissémination accidentelle des substances radioactives. Cette protection doit être assurée dans toutes les circonstances ; en fonctionnement normal, en cas d'incidents et d'accidents possibles.

Les dispositions appropriées doivent être prises par les concepteurs puis par les exploitants pour que la protection soit effective pendant l'exploitation puis le démantèlement.

En fonctionnement normal, la conception et les dispositions d'exploitation doivent conduire à des expositions aux rayonnements aussi faibles que raisonnablement possible[134] et en tout état de cause inférieures à la contrainte retenue[135].

En cas d'incident, l'exposition du personnel doit rester inférieure à la limite fixée par la réglementation qui est de 20 mSv (décret n° 2003-296 du 31 mars 2003) et celle du public à 1 mSv (décret n° 2002-460 du 4 avril 2002).

En cas d'accident pris en compte dans le dimensionnement des installations, les risques d'expositions à des rayonnements ionisants ou à des rejets radioactifs ne doivent pas être inacceptables pour le public et l'environnement.

Les risques précédents prennent en compte l'exposition externe provoquée par les différents types de rayonnements reçus directement, par diffusion ou par effet de ciel[136], ainsi que l'exposition interne provoquée par inhalation.

Les conséquences radiologiques en cas d'accident doivent être d'autant plus faibles que la probabilité d'occurrence de cet accident est élevée. La limitation des conséquences radiologiques des accidents doit résulter d'une démarche de réduction effective du risque.

Par ailleurs, les scénarios accidentels (dits « hors dimensionnement ») devront être identifiés dans le cadre de l'élaboration du plan d'urgence interne de l'installation : PUI.

5.3.2.1 Fonctions de sûreté

Pour atteindre les objectifs précédents, plusieurs fonctions de sûreté sont conférées aux installations d'entreposage.

Confinement des substances radioactives et toxiques

Le confinement des substances radioactives et toxiques consiste à limiter leur dissémination. Cette fonction est assurée par l'interposition de systèmes ad hoc entre les substances radioactives et les locaux ou l'environnement. Un premier système assure le confinement en fonctionnement normal au plus près de la substance radioactive. Il contribue au maintien de la propreté radiologique des locaux. D'autres systèmes de confinement peuvent compléter le premier système lors de situations incidentelles ou accidentelles, afin de maîtriser les rejets vers l'environnement.

Un système de confinement peut comporter une composante statique et une composante dynamique.

Une composante statique est généralement constituée par des enveloppes (emballages, colis, équipements, parois des locaux…) qui constituent des barrières à la migration des radionucléides, quelles que soient les conditions extérieures en fonctionnement normal ou incidentel.

En règle générale, les colis de déchets entreposés contribuent au confinement statique des substances radioactives[137].

---

[134] Principe "ALARA" (as low as reasonably achievable).

[135] L'Andra retient une contrainte de 0,25 $mSv.an^{-1}$ pour les personnes du public restant à la limite des installations, 5 $mSv.an^{-1}$ pour le personnel travaillant en zone nucléaire et 0,25 $mSv.an^{-1}$ pour le personnel travaillant hors zone nucléaire. Dans les études présentées aux chapitres 6 et 7, les équipements de protection ont été prédimensionnés sur la base d'un débit de dose horaire de 3 $\mu Sv.h^{-1}$ à 30 centimètres dans les zones nucléaires avec présence permanente d'opérateurs (1 500 $h.an^{-1}$).

[136] Lorsqu'une source d'irradiation n'est pas couverte par un écran de radioprotection, les rayonnements qu'elle émet interagissent avec l'air atmosphérique situé au-dessus et créent un rayonnement diffus qui est source d'irradiation indirecte.

[137] Dans les études présentées aux chapitres 6 et 7, on considère une contamination surfacique externe maximale des colis de 4 $Bq.cm^{-2}$ (β et γ) et 0,4 $Bq.cm^{-2}$ (α) en fonctionnement normal.

Cette contribution au confinement peut reposer sur le conteneur, mais aussi sur la nature même de la substance radioactive ou de sa matrice d'enrobage, si celles-ci présentent une grande stabilité physicochimique et une grande résistance aux facteurs de dégradations tels que chocs mécaniques, lixiviation par l'eau, etc.

Une composante dynamique est obtenue par une ventilation nucléaire qui crée une cascade de pressions différentielles dirigeant les flux d'air des zones à faible risque de contamination vers les zones à risque élevé de contamination.

Selon les risques, le système de ventilation peut être équipé d'un dispositif d'épuration qui permet de traiter la totalité du volume d'air extrait pour retenir les radionucléides qu'il pourrait éventuellement contenir sous forme de poussières ou d'aérosols.

Dans le cas d'une mise en œuvre complémentaire d'un confinement dynamique et d'un confinement statique, la surveillance de la contamination éventuelle des dispositifs d'épuration permet de détecter une éventuelle défaillance du confinement statique.

Le nombre et les performances des systèmes de confinement dépendent des résultats de l'analyse de risques, et en particulier des radionucléides présents dans l'installation, de leur quantité, de leur forme physicochimique, des conditions d'environnement et d'exploitation.

Les dispositions doivent être prises dans les installations d'entreposage de colis de déchets HA et MAVL pour qu'en cas d'accident, toutes les personnes puissent être évacuées vers l'extérieur de façon sûre.

<u>Limitation de l'exposition radiologique des personnes et de l'environnement</u>

Pendant les phases de manutention et d'entreposage des colis de déchets, en fonctionnement normal, comme en cas d'incidents ou d'accidents possibles, la limitation à l'exposition directe aux rayonnements ionisants est assurée par des écrans interposés entre les colis de déchets radioactifs d'une part, les personnes et l'environnement d'autre part.

Les installations d'entreposage font l'objet d'un zonage de radioprotection qui est une mesure de prévention contre le dépassement des limites de dose reçues par les travailleurs et le public (expositions externe et interne), en conditions normales d'exploitation. Il doit être cohérent avec la conception générale de l'installation et la localisation des postes de travail.

Les zones sont réparties en fonction des valeurs de dose qui y seraient reçues par les personnes qui y séjournent :

- zones simplement surveillées ;
- zones contrôlées ;
- zones spécialement réglementées ;
- zones interdites.

Les conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites, sont précisées par arrêtés ainsi que les règles d'hygiène, de sécurité, d'entretien et les mesures de surveillance et de contrôle dont chaque zone doit faire l'objet.

En situation accidentelle, l'exposition radiologique peut être induite par une contamination radioactive faisant suite à une dispersion des matières radioactives dans l'environnement et leur ingestion/inhalation par le personnel ou le public. La limitation de la contamination est alors assurée par le confinement des matières radioactives.

Maîtrise de la criticité

Le risque de criticité est lié à la présence de radionucléides fissiles (uranium 235, plutonium 239) dans des colis de déchets. Les principes généraux, les modalités de contrôle et les critères de dimensionnement sont fournis par la règle fondamentale de sûreté (RFS) n° I.3.c émise par l'ASN.

La maîtrise du risque de criticité consiste à prévenir le déclenchement d'une réaction de fission en chaîne non contrôlée. Elle s'obtient par les modes de contrôle suivants : masse de matières fissiles, géométrie et disposition des colis (pas du réseau d'entreposage et nombre de niveaux de gerbage). Elle doit être garantie dans toutes les configurations prévisibles en fonctionnement normal et en cas d'incidents ou d'accidents considérés comme possibles.

En entreposage, un accident de criticité ne doit en aucun cas résulter d'une seule anomalie (défaillance d'un composant, d'une fonction, d'une erreur humaine) ou d'un seul accident interne (incendie, inondation, etc.). Les anomalies qui, cumulées, peuvent le provoquer doivent être rigoureusement indépendantes, c'est-à-dire ne pas avoir de cause commune d'occurrence. Leur apparition simultanée doit avoir une probabilité très faible et faire l'objet d'une surveillance permettant une détection précoce, laissant un temps suffisant pour une intervention.

Évacuation de la chaleur

L'évacuation de la puissance thermique produite en entreposage par les colis HA exothermiques et par certains colis MAVL doit permettre de maintenir les températures sous les valeurs limites au-delà desquelles les matrices de déchets, les conteneurs des colis, les différentes structures et équipements constituant les entrepôts subissent une dégradation de leurs performances.

Les températures maximales que peuvent supporter les différents composants sont spécifiées. Celles concernant les colis sont intégrées dans les spécifications d'acceptation en entreposage.

Ainsi, pour les déchets HA vitrifiés, on cherche à éviter la recristallisation du verre en maintenant sa température inférieure à 450 °C, en conditions climatiques normales[138].

Pour les bétons à base de liants hydrauliques, une température maximale admissible de 70 °C en fonctionnement normal est généralement considérée comme garantissant le maintien sur une durée séculaire, des propriétés mécaniques, chimiques et de confinement.

Une température de 80 °C est dans le même ordre d'idée considérée comme acceptable pendant une dizaine de jours, durée généralement retenue pour les incidents d'exploitation : obturation de la ventilation, coupure de l'alimentation électrique, etc. ou pour les épisodes climatiques extrêmes.

Enfin, on peut se fixer à ce stade un objectif de température limite dans le terrain encaissant de 80 °C (particulièrement pour une construction à faible profondeur, cf. chapitres 6 et 7).

Le refroidissement doit être assuré dans toutes les configurations rencontrées en fonctionnement normal, en particulier lorsque les ouvrages sont remplis de colis ou lorsqu'une opération de manutention diminue l'efficacité du refroidissement (obturation partielle de la veine d'air de ventilation, par exemple). Il doit être assuré également en cas d'incident (arrêt des ventilateurs) ou d'accidents considérés comme possibles (incendie, criticité).

Le système de surveillance des entrepôts accueillant des colis exothermiques assure un suivi de la température du fluide caloporteur qui est généralement l'air du circuit de ventilation. Les températures des colis et des composants des entrepôts peuvent également être surveillées.

[138] Une température de 510 °C pourra être tolérée en conditions climatiques extrêmes.

5.3.2.2 Exigences de sûreté liées aux risques internes

Des dispositions constructives doivent être prises à la conception et des mesures organisationnelles mises en place pour l'exploitation de manière à ce que les installations maintiennent dans le temps leurs fonctions de sûreté.

Ces dispositions et ces mesures visent à prévenir l'apparition de défaillances techniques, humaines ou organisationnelles. Si un incident survient, elles servent à limiter leurs conséquences, à sauvegarder les systèmes assurant des fonctions de sûreté et plus généralement, à éviter que l'incident ne conduise à un accident. Ces dispositions incluent la mise en place de consignes et des formations du personnel.

Ces dispositions et ces mesures constituent des lignes successives de défense en application du principe de défense en profondeur.

Elles concernent en particulier :

- des dispositions relatives au choix des matériaux, au dimensionnement, à la qualité de fabrication et de mise en œuvre. Elles sont prises pour être adaptées aux conditions extrêmes de fonctionnement ou aux conditions résultant d'incidents ou d'accidents possibles ;
- des systèmes d'auscultation et de surveillance des paramètres significatifs qui figureront finalement dans les règles générales d'exploitation. En particulier, ces systèmes détectent toute sortie des valeurs de ces paramètres hors du domaine de fonctionnement autorisé et déclenchent dans ce cas des actions de maintenance, de correction ou des interventions spécifiques ;
- des dispositifs et des actions de sauvegarde. Ils agissent sur les systèmes qui assurent des fonctions de sûreté pour limiter les charges et les sollicitations en deçà des valeurs prévues dans le dimensionnement.

<u>Les risques liés aux défaillances des composants</u>

Chacune des fonctions de sûreté repose sur un composant de l'installation d'entreposage : les colis de déchets, le système de refroidissement, la structure de l'entrepôt, etc. ou sur une combinaison de ces composants.

Toutes les conditions normales et prévisibles de fonctionnement doivent être étudiées pour en déduire les contraintes d'environnement, les chargements mécaniques et thermiques les plus importants qu'auront à supporter les différents composants contribuant à une fonction de sûreté. Ils sont conçus, qualifiés, construits, mis en place, contrôlés et exploités pour pouvoir supporter ces contraintes et ces charges avec des marges de dimensionnement suffisantes.

Les marges de dimensionnement prises à la conception sont liées à d'éventuels modes communs de défaillance qui doivent faire l'objet d'une étude attentive. C'est le cas en particulier lorsqu'un composant est constitué d'un grand nombre d'objets identiques (par exemple les conteneurs des colis de déchets).

<u>Les risques liés au vieillissement des composants</u>

Compte tenu de la durée de l'ordre de la centaine d'années envisagée à l'avenir pour certains entreposages, les données sur le vieillissement des composants qui assurent les fonctions de sûreté en fonctionnement et en conditions d'environnement normales, doivent être prises en compte à la conception. Dans les conditions d'entreposage, le comportement des matériaux utilisés doit être suffisamment prévisible pour pouvoir montrer que les altérations qu'ils subiront durant la période d'exploitation seront soit négligeables, soit compatibles avec le fonctionnement prévu (correspondant au domaine autorisé).

Les marges de dimensionnement sont liées également aux possibilités de surveillance des phénomènes de vieillissement et à la facilité de la maintenance préventive. Le vieillissement relativement rapide d'un composant peut être admissible, s'il peut être suivi et si le remplacement du composant est sûr et possible.

Les risques mécaniques

Les risques mécaniques sont liés à des ruptures affectant les systèmes de manutention, les circuits de gaz ou de liquide sous pression et les objets tournant à grande vitesse.

Par principe, la conception vise à éviter le risque de chute ou de collision d'un colis de déchets, et/ou à maîtriser les conséquences en évitant la dissémination de substances radioactives.

La rupture de réservoirs ou de tuyauteries contenant des gaz ou des liquides sous pression peut entraîner des projections de fluides et des fouettements de tuyauterie, en plus d'une éventuelle inondation. De même, la rupture des pièces tournant à grande vitesse peut les transformer en projectiles dangereux. Ces risques s'ajoutent à ceux liés à la perte de tout ou partie des fonctions que ces composants assurent.

Des dispositions constructives doivent être prises pour protéger le personnel et pour éloigner les circuits de fluide sous pression et les pièces tournantes des composants des systèmes assurant des fonctions de sûreté ou en cas d'impossibilité, pour mettre en place des parades adaptées.

Les risques liés aux gaz de radiolyse

Dans certains cas, la radiolyse des déchets radioactifs et des matériaux de confinement produit des gaz combustibles ou explosifs (hydrogène, hydrocarbures gazeux…).

Les risques afférents doivent être identifiés, puis évalués et finalement faire l'objet de dispositions adéquates en matière de construction et d'organisation. Les systèmes de ventilation sont conçus pour que la concentration des différents gaz reste largement en dessous de la limite d'explosivité fixée par la réglementation.

Les risques d'incendie interne

Les risques d'incendie interne en entreposage de colis de déchets HA et MAVL sont généralement liés aux équipements électriques (engins de transfert, éclairage, acquisition de données, etc.), aux véhicules de transport et aux engins de manutention équipés de moteur thermique.

La prévention et la limitation des risques d'incendie interne reposent sur un choix des matériaux pour la construction et l'équipement qui limite la charge calorifique, sur la surveillance, sur la disponibilité de moyens de lutte contre l'incendie et sur la limitation de la propagation de l'incendie et de ses conséquences : émission de fumée, dispersion de substances radioactives, toxiques, corrosives, inflammables ou explosives. Les dispositions à prendre sont indiquées par la RFS n° I.4.a et l'arrêté du 31 décembre 1999 modifié le 31 janvier 2006.

Les risques d'inondation interne

Une inondation interne peut survenir en entreposage par rupture de tuyauteries ou d'équipements hydrauliques, par rupture ou débordement de réservoir, par défaillance des systèmes de drainage ou d'évacuation des eaux. Enfin, elle peut résulter d'une récupération insuffisante des eaux d'extinction en cas d'incendie.

La prévention des risques d'inondation interne repose sur des dispositions constructives d'évacuation et de rétention des eaux : réseaux de drainage gravitaire, cuvelage étanche sous les circuits et les équipements hydrauliques, etc. Elle repose également sur la surveillance et la détection d'anomalie de fonctionnement.

Ces dispositions doivent protéger en particulier les circuits électriques, les composants assurant des fonctions de sûreté et les barrières de confinement des substances radioactives. Elles doivent assurer que l'inondation interne ne conduira en aucun cas à un accident de criticité.

Les eaux susceptibles d'être contaminées en situation de fonctionnement normal ou incidentel sont collectées dans des réseaux spécifiques munis de systèmes de surveillance.

Les risques chimiques et toxiques

La conception et l'exploitation d'un entreposage de colis de déchets HA et MAVL font l'objet de dispositions particulières relatives aux matériaux et matières présentant une toxicité ou plus généralement, pouvant conduire à un risque chimique : explosion, corrosion, production de chaleur, dégagements de gaz toxiques, pollution. Une attention particulière doit être portée aux interactions entre ces différents matériaux ou matières qui combinées peuvent aboutir à un risque chimique, toxique ou explosif.

5.3.2.3 Exigences de sûreté liées aux risques externes

Les risques externes associés à un entreposage dépendent du site d'implantation. L'évaluation du risque passe par la définition de cibles potentielles qui subiraient directement ou indirectement des dégradations suite à une agression externe. Une cible est un système, une structure ou à un regroupement de ceux-ci qui assurent une ou des fonctions de sûreté (alvéoles d'entreposage, cheminée de ventilation, etc.).

Pour certains risques d'agression externe et pour chaque cible, une évaluation doit être faite de la probabilité d'accident entraînant des conséquences inacceptables pour l'homme ou pour l'environnement. Au-dessus d'un seuil de probabilité, considéré comme acceptable et défini dans les RFS n° I.1.a et n° I.1.b, des mesures de protection doivent être adoptées. Elles passent généralement par la séparation physique (écran) de la cible et de l'agresseur.

Les risques de chute d'avion

La réglementation demande de prendre en compte, dans la conception et pendant les différentes phases de vie des installations, les risques induits par le trafic aérien au travers de la RFS n° I.1.a. Cette RFS est basée sur l'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un dégagement inacceptable de substances radioactives à la limite du site, causée par une chute d'avion.

La RFS n° I.1.a indique un seuil de probabilité de 10^{-7}, au-delà duquel des protections adaptées devront être mises en place. Pour un entreposage de colis de déchets HA et MAVL, les protections consistent essentiellement en un renforcement du génie civil de l'entrepôt et de la zone de manutention des colis, soit par augmentation de leur résistance mécanique, soit par interposition d'une couche de sol remblayée ou laissée en place dans le cas d'une construction à faible profondeur.

Les risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication

Les installations industrielles (usines, canalisations de transports et les voies de communications : routes, voies navigables, etc.) sont des sources potentielles d'accidents qui peuvent se traduire par des incendies, des explosions, des dégagements de gaz et de débris, des inondations susceptibles d'agresser un entreposage situé dans leur voisinage.

La méthode de calcul de la probabilité d'occurrence d'un dégagement inacceptable de substances radioactives à la limite du site, suite à une agression de ce type sur l'entreposage, est reprise de la RFS n° I.1.b.

Les risques liés aux séismes

La tenue parasismique des systèmes et des structures qui assurent des fonctions de sûreté ou qui sont susceptibles d'agresser ceux qui en assurent, est étudiée en appliquant les recommandations de l'Autorité de sûreté nucléaire présentées par le guide ASN/GUIDE/2/01 du 26 mai 2006.

Les caractéristiques des mouvements sismiques horizontaux et verticaux à prendre en compte sont définies par la RFS n° 2001-01. Elles sont basées sur les séismes connus les plus importants, qui ont affecté dans le passé historique, la zone géographique d'implantation de l'entreposage, en retenant la position de l'épicentre la plus défavorable.

Les risques liés aux inondations externes

Les installations d'entreposage de colis de déchets HA et MAVL doivent être protégées des risques d'inondation d'origine externe non seulement par débordement de cours d'eau ou par raz-de-marée s'ils sont situés en bord de mer, mais aussi entre autres, par ruissellement de surface en cas de précipitations importantes et par battement de la nappe phréatique.

La principale exigence de sûreté associée à ce risque est d'empêcher toute arrivée d'eau à l'intérieur des installations et le cas échéant, de collecter les effluents susceptibles d'être contaminés en fonctionnement normal, incidentel et accidentel dans des réseaux spécifiques de manière à protéger les nappes d'eaux superficielles et souterraines.

Un guide applicable à toutes les installations nucléaires de base, appelé « Guide Inondation », a pour objectif d'identifier les situations à prendre en compte pour le dimensionnement des installations et de définir les protections à mettre en œuvre selon les phases de vie des installations. Ce document complétera la RFS n° I.2.e applicable aux installations électronucléaires, dans laquelle est indiquée la cote minimale d'implantation qui permet d'éviter le contact de l'eau avec les systèmes et structures qui assurent des fonctions de sûreté. Cette RFS mentionne également les ouvrages de protection contre l'inondation qui doivent le cas échéant être mis en place.

Les risques liés aux intempéries exceptionnelles

Le dimensionnement des ouvrages d'entreposage doit prendre en compte les surcharges climatiques extrêmes liées à la neige et au vent, qui ont une probabilité d'occurrence sur leur durée d'exploitation prévisionnelle.

Elles sont évaluées suivant les règles applicables aux bâtiments et ouvrages d'art sur le territoire français (Document technique unifié [DTU] « neiges et vents ») suivant les dimensions, l'exposition, l'orientation et la situation géographique.

Lors de ces évènements climatiques exceptionnels les conditions d'ambiance à l'intérieur des installations d'entreposage doivent rester compatibles avec un bon fonctionnement des équipements ou composants assurant des fonctions de sûreté de l'entreposage ou susceptibles de les perturber.

Conformément à ce qui est généralement retenu pour les installations nucléaires de base françaises, les installations d'entreposage doivent être conçues pour fonctionner sans incident à des températures extérieures comprises entre - 15°C et + 35°C. Cependant les températures extrêmes à prendre en compte pour le dimensionnement des installations dépendront des données climatiques du site d'implantation.

Les risques liés à la foudre

Les protections contre les effets de la foudre à mettre en œuvre sur les installations d'entreposage sont définies dans l'arrêté du 31 décembre 1999 modifié par l'arrêté du 31 janvier 2006 et les prescriptions de l'arrêté du 28 janvier 1993 pour les installations classées peuvent être utilement consultées.

Les risques liés aux feux de forêts

Selon le site d'implantation de l'entreposage, des dispositions spécifiques de protection contre les feux de forêts seront prises conformément au plan de prévention des risques naturels (PPR).

6

Options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets HA

6.1	*Introduction des études 2007-2009 d'options techniques d'entreposage de colis de déchets HA*	*175*
6.2	*Principales questions techniques*	*177*
6.3	*Etude de faisabilité d'une architecture en puits verticaux avec regroupement des colis en casiers*	*196*
6.4	*Etude de faisabilité d'un bâtiment multi-étagé*	*205*
6.5	*Etude de faisabilité de casemates modulaires en béton sur radier*	*215*
6.6	*Etude de faisabilité d'un d'entrepôt à faible profondeur construit à ciel ouvert*	*223*
6.7	*Etude de faisabilité d'un entrepôt en galeries souterraines*	*234*
6.8	*Bilan des études 2007_2009, introduction des études effectuées à partir de 2011*	*244*
6.9	*Les évolutions possibles du concept HA1 dans une optique d'optimisation (entreposage en puits verticaux et regroupement des colis en casiers)*	*249*
6.10	*Les évolutions possibles du concept HA2 dans une optique d'optimisation (entreposage sur dalle et ventilation mécanique horizontale)*	*253*
6.11	*Les évolutions possibles du concept HA3 dans une optique d'optimisation (entreposage en casemates modulaires avec ventilation naturelle)*	*256*

Le chapitre 5 identifie de nouveaux besoins d'entreposage à divers horizons temporels. Les objectifs à satisfaire et les exigences de sûreté associées ne s'éloignent pas fondamentalement des fonctions assurées par les installations existantes présentées au chapitre 3. Cependant la complémentarité avec le stockage réversible a suggéré d'explorer certaines évolutions du cahier des charges d'entrepôts futurs. Pour les colis de déchets HA, celles-ci sont principalement centrées sur un prolongement de la durée de vie de l'entreposage, à l'échelle du siècle, une plus grande polyvalence qui permettrait d'accueillir des colis primaires et de stockage, la surveillance, et enfin des domaines de fonctionnement thermiques spécifiques.

Ce chapitre présente les recherches effectuées depuis 2007 sur les options techniques d'entreposage de colis de déchets HA.

Comme cela a été introduit au chapitre 1, ces recherches ont été menées en deux phases ;

1. En 2007 une recherche large de solutions techniques susceptibles de répondre aux besoins a été entreprise, puis certaines options ont été approfondies jusqu'en 2009 pour en préciser le domaine possible d'application. Cette première phase de recherches en matière d'ingénierie a été réalisée par Areva Ingénierie (SGN) et Tractebel Engineering (Itena, Coyne et Bellier) en liaison étroite avec l'Andra qui en a fixé les principales données d'entrée. Elle a permis de réaffirmer la pertinence des solutions industrielles déjà mises en œuvre, mais a ouvert également sur des possibilités d'adaptation, voire des solutions nouvelles pouvant satisfaire aux évolutions de cahier des charges.

2. A partir de 2011, la seconde phase visait à une optimisation de trois concepts innovants d'entreposage de colis de déchets HA sélectionnés à l'issue de la première phase. La seconde phase a porté aussi plus spécifiquement sur les systèmes de surveillance des composants de l'installation d'entreposage et des colis de déchets. Elle a mobilisé Tractebel Engineering France sur la base des orientations définies par l'Andra.

Dans un premier temps, le chapitre introduit le contexte et les données d'entrée de la première phase (§ 6.1) puis décrit les principales pistes technologiques au regard des questions structurant l'ingénierie d'installations d'entreposage de colis de déchets HA : le mode de manutention et d'entreposage des colis, l'évacuation de la chaleur et les principes d'architecture (§ 6.2). Il expose les solutions techniques identifiées dans la première phase d'études, et justifie le choix d'approfondir certaines options innovantes pour mieux en apprécier la faisabilité. Les concepts basés sur ces solutions sont ensuite présentés au stade d'études de faisabilité (§ 6.3 à 6.7).

Le chapitre rend compte ensuite des études d'optimisation de la seconde phase : partant d'un bilan des enseignements de la première phase, il justifie la sélection de trois concepts (§ 6.8). Il présente les évolutions possibles de ces trois concepts telles qu'elles ressortent des études réalisées. Ces évolutions visent à en améliorer sensiblement les performances (§ 6.9 à 6.11).

Pour mémoire, les éléments décrits aux sections 6.1 à 6.7 avaient déjà été présentés dans le dossier d'étape remis fin 2009.

6.1 Introduction des études 2007-2009 d'options techniques d'entreposage de colis de déchets HA

6.1.1 Recherche de solutions techniques

Les études d'ingénierie de la première phase ont été menées parallèlement au recensement des besoins d'entreposage qui avait été présenté en 2009 (chapitre 5). Le choix des données d'entrée a donc dû anticiper sur ce recensement.

Il avait été initialement décidé d'explorer deux types de besoins potentiels vis-à-vis de la décroissance thermique des déchets HA fortement exothermiques de la famille F1-3-01 :

- un entreposage de décroissance de 2 kW jusqu'à 500 W (soit une durée de conservation de 60 ans) ou jusqu'à 200 W (soit une durée de conservation de 110 ans) ;
- un entreposage complémentaire aux entrepôts existants qui permettrait une décroissance de 500 W jusqu'à 200 W, avec une durée de conservation de 50 ans.

Au cours des études, il est apparu que le maintien d'une exigence d'accueil des colis à 2 000 W limiterait le champ des solutions et qu'il fallait aussi explorer des options avec une puissance initiale intermédiaire située dans la gamme de 800 à 1200 W.

Pour chaque cas de décroissance thermique, des solutions ont été recherchées pour accueillir des colis primaires ou des colis de stockage. Initialement les options étudiées étaient dédiées soit aux uns soit aux autres.

Cependant, il a été entrevu en cours d'études qu'aucune solution n'est dans son principe exclusivement applicable aux colis primaires ou de stockage.

En effet la gamme des masses des colis primaires et de stockage (de 500 kg à 2 tonnes) autorise des techniques de manutention communes. De même les écarts géométriques entre colis primaire et colis de stockage restent limités.

A titre d'exemple, l'écart de diamètre entre colis primaire CSD-V et colis de stockage correspondant est de 160 mm (430 mm vs 590 mm) soit +37 % pour le colis de stockage, et l'écart de longueur de +269 mm (1 338 mm vs 1 607 mm) soit +20 % pour le colis de stockage.

Vis-à-vis du débit de dose[139], les protections radiologiques définies pour un entreposage de colis primaires couvrent les besoins moindres des colis de stockage. Si la protection vis-à-vis de la corrosion atmosphérique apparaît a priori plus contraignante pour l'acier non allié des surconteneurs que pour l'acier inoxydable des conteneurs primaires, les objectifs de durabilité conduisent en tout état de cause à placer les colis dans un domaine de faible humidité relative favorable aux deux types de matériaux.

Ainsi, les différences qui demeurent ne relèvent pas des principes de conception, mais d'écarts de dimensionnement des solutions techniques.

Une piste d'étude a porté sur l'aptitude d'une installation d'entreposage à être « reconfigurée » : elle répondrait dans un premier temps à un besoin d'entreposage de colis primaires ; dans un second temps, elle serait reconfigurée géométriquement pour répondre à un besoin potentiel d'entreposage de colis de stockage, notamment en soutien à la réversibilité. Il s'ensuit naturellement une capacité d'entreposage moindre en colis de stockage qu'en colis primaires. Pour les études, on n'a pas cherché à accueillir, aux mêmes emplacements, des colis produits par l'AVM (famille F1-4-01) ou par les ateliers R7 et T7 de La Hague (CSD-V, familles F1-3-01 et F1-3-02), compte tenu de leurs écarts géométriques.

[139] Le débit de dose au contact des colis primaires des colis des familles F1-4-01 et F1-3-02 est pris égal à 200 $Sv.h^{-1}$ à la date de 2025. Celui au contact des colis primaires de la famille F1-3-01 varie de 1 200 $Sv.h^{-1}$ à la production à 240 $Sv.h^{-1}$ à un âge de 60 ans.

L'aptitude d'une solution technique à la reconfiguration s'est ainsi focalisée à ce stade sur l'accueil, en lieu et place du colis primaire, du colis de stockage correspondant.

En parallèle, la piste spécifique reposant sur l'utilisation d'emballages de transport, qui est déjà développée pour les combustibles usés ou les déchets HA vitrifiés en Suisse, Belgique et Allemagne (chapitre 3) a aussi été explorée, pour une décroissance thermique de 2 kW jusqu'à 200 W.

Sans préjudice du recensement des besoins effectué depuis, il avait été décidé de considérer les déchets HA vitrifiés du scénario S1b du modèle d'inventaire de dimensionnement associé au dossier 2005 argile soit 36 040 colis : 32 100 colis de la famille F1-3-01, 800 colis de la famille F1-3-02 et 3 140 colis de la famille F1-4-01.

Pour accueillir un tel volume, les installations étudiées ont été découpés en modules. Un module est défini comme une structure construite en un seul tenant (ou un ensemble de petites structures construites en une phase continue de travaux) et dont l'ensemble des répliques éventuelles permettrait de couvrir la totalité de l'inventaire considéré. Pour les études, la capacité hypothétique d'un module était en général comprise entre 3 600 et 10 800 colis (630 à 1 890 m^3).

Outre une implantation classique en surface, la recherche de solutions techniques a été étendue à une construction en faible profondeur. Afin de définir un jeu d'hypothèses en matière de contexte géologique, l'étude à faible profondeur s'est fondée sur les connaissances acquises en Meuse/Haute Marne pour le projet Cigéo, sans préjudice de la localisation d'une éventuelle installation de ce type.

6.1.2 Etudes de faisabilité

Les options de conception ressortant de la première sous-phase d'études ont été comparées sur la base de différents critères :

- Coût relatif : construction ; exploitation ; démantèlement ; emprise au sol (foncier).
- Sûreté et sécurité : surveillance des colis (dont accessibilité pour contrôle) ; surveillance de l'installation (vieillissement, incendie) ; simplicité de mise en œuvre de la protection du personnel contre les rayonnements ionisants ; confinement des matières radioactives (systèmes statiques et dynamiques) ; risque de corrosion des colis ; risque d'endommagement physique des colis ; impact environnemental.
- Résistance aux agressions externes : robustesse vis-à-vis d'un séisme, d'une chute d'avion, de conditions climatiques extrêmes ; robustesse face aux risques industriels environnants.
- Flexibilité et modularité : capacité à accepter un flux de colis supérieur ; capacité à recevoir des colis différents ; capacité d'extension ; capacité à prolonger la durée d'exploitation au-delà de la période initialement prévue.
- Evolutivité et risques : retour d'expérience industriel ; capacité à anticiper les évolutions d'exigences de sûreté ; besoins de développements ; possibilité d'éco-conception (production de déchets, bilan énergétique, bilan CO2).

La comparaison a mis en exergue la pertinence des solutions industrielles existantes. C'est en particulier le cas de l'empilement de colis en puits verticaux mis en œuvre dans E-EV-SE et décrit au chapitre 3.

Parallèlement, quelques options plus originales ont montré un intérêt potentiel. Pour mieux l'évaluer, cinq options de conception contrastées ont été sélectionnés pour un approfondissement dans le cadre de la seconde sous-phase d'études. L'argumentation justifiant le choix de ces options est présentée dans la suite.

Trois de ces options de conception concernent une implantation en surface :

1) Architecture verticale en puits refroidie par convection naturelle, dérivée de E-EV-SE mais adaptée au besoin de polyvalence colis primaire/colis de stockage. Elle utilise des paniers de regroupement des colis, impliquant des puits de plus grand diamètre que E-EV-SE. Cette option peut permettre de répondre à des besoins de capacité d'entreposage importants, par la constitution de plusieurs modules successifs.

2) Architecture horizontale en bâtiment multi-étagé avec convection forcée, dérivée de ECC (pour déchets MAVL faiblement exothermiques). Cette option originale pour des déchets HA permet d'évaluer l'intérêt et les limites d'un refroidissement par convection forcée, sur une approche différente de celle déjà mise en œuvre sur R7/T7. Elle n'a été retenue que pour l'accueil de colis de 500 à 200 W.

3) Casemate béton contenant chacune un panier de colis, dérivée du Nuhoms® développé pour l'entreposage de combustibles usés sur des centrales nucléaires (cf. chapitre 3). Cette option de conception est très modulaire. Elle répondrait vraisemblablement à des besoins de capacité totale plus réduite que les autres.

En complément, l'étude de deux options de conception à faible profondeur a été retenue pour appréhender l'impact d'une telle implantation sur la conception et la construction :

4) Architecture verticale en puits, construite à ciel ouvert (bâtiment enterré cylindrique), avec refroidissement par convection forcée. Le cas d'application étudié correspond à une construction dans une formation comparable aux marnes à exogyres supérieures en Meuse/Haute-Marne (couche comprise entre -20m et -70m), sous la nappe phréatique. Elle met en œuvre une solution avec des puits de grande hauteur. Cette option permet d'appréhender les coûts et contraintes liées à une construction à ciel ouvert.

5) Architecture horizontale en galeries avec colis primaires à la verticale (comme dans ECC). L'application étudiée est supposée implantée dans un horizon calcaire comparable à l'horizon « K1 » de l'Oxfordien en Meuse/Haute-Marne (couche comprise entre -125m et -145m), sous le niveau de la nappe phréatique. Cette option illustre un fonctionnement en souterrain avec un refroidissement par convection naturelle (pour des colis de 500 W de puissance initiale).

Dans le cadre de l'étude de faisabilité de la cinquième option ci-dessus, un mode de transfert des colis de déchets HA entre la surface et une cellule de réception souterraine a été exploré par un puits foré de petit diamètre doté de dispositifs originaux vis-à-vis du risque de chute.

6.2 Principales questions techniques

Les choix d'options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets HA portent essentiellement sur :

- le mode de manutention et le positionnement des colis, individuellement ou avec un regroupement ;
- le principe d'évacuation de la chaleur ;
- l'architecture générale des modules d'entreposage.

Ces choix influent sur les possibilités de surveillance des colis entreposés et de l'installation d'entreposage, au travers (i) de la plus ou moins grande facilité d'intégration de dispositifs d'auscultation, (ii) de l'accessibilité des colis entreposés.

6.2.1 Manutention et positionnement des colis HA

La conception de l'entreposage est structurée, entre autres, par la définition de l'unité de base qui est manutentionnée et entreposée, ainsi que par sa position géométrique dans l'installation et par son mode de manutention.

L'unité de base peut correspondre à un colis unique, mais peut aussi consister en un regroupement de colis dans un casier ou un panier. L'approche par regroupement présente un caractère novateur par rapport aux entrepôts existants et peut apporter une réponse intéressante aux nouveaux besoins.

6.2.1.1 Entreposage unitaire des colis HA

Les concepts d'entreposage mis en œuvre industriellement à Cadarache, La Hague et Marcoule, ainsi qu'une partie de ceux qui ont été identifiés durant la première phase d'études, reposent sur un entreposage des colis à l'unité.

Les colis HA peuvent être entreposés individuellement dans l'une des trois positions suivantes[140] :

- Colis empilés verticalement dans un puits (type E-EV-SE) en surface ou à faible profondeur (Figure 6.2-1) ;
- Colis posés verticalement sur un plancher de bâtiment (principe de ECC[141] – Figure 6.2-2), ou sur un radier dans une galerie à faible profondeur (Figure 6.2-3) ;
- Colis disposés horizontalement dans un tube ou sur un support de maintien (demi-tube, goulotte, etc.) (Figure 6.2-4).

Les entrepôts actuels adoptent un positionnement vertical des colis primaires.

Une dépose horizontale (Figure 6.2-4) s'apparente à l'architecture des alvéoles de stockage présentée au chapitre 4. Elle en diffère cependant par l'absence d'exigence de minimisation des vides résiduels dans l'alvéole. Pour les colis de stockage, il paraît ainsi naturel de reconduire le principe de mise en place et retrait par glissement retenu en stockage ; les surconteneurs sont en effet munis de patins en céramique industrielle facilitant ce glissement. Cependant ils peuvent aussi être manutentionnés verticalement.

En revanche la manutention unitaire de colis primaires à l'horizontale imposerait de définir un procédé évitant l'endommagement du conteneur primaire par arrachement de métal. La solution de poussée et glissement du colis est donc à éliminer. D'autres solutions sont envisageables, mais elles complexifieraient la manutention et augmenteraient le volume d'entreposage nécessaire, sachant que le CSD-V est conçu pour une manutention verticale.

On remarquera que les différentes positions d'entreposage verticales ou horizontales ne présentent pas la même facilité de surveillance. Ainsi, dans un puits, il n'y a pas de possibilité de surveillance individualisée d'un colis, sauf à retirer le colis. Par contre, pour un colis déposé verticalement sur un plancher (Figure 6.2-2) ou horizontalement (Figure 6.2-4), il est possible d'utiliser ou d'aménager[142] un espace pour effectuer une surveillance de chaque colis.

Pendant la manutention, la protection radiologique peut s'effectuer suivant deux principes généraux bien connus : manutention réalisée intégralement sous hotte de protection radiologique jusqu'à la zone active d'entreposage ou manutention réalisée en tout ou partie en cellule irradiante.

---

[140] La position d'entreposage est reliée au choix et à l'efficacité du mode de refroidissement du colis. Le refroidissement par air en mode convectif est plus aisé lorsque l'axe du colis est parallèle à l'axe de la structure d'accueil (Figure 6.2-1 & Figure 6.2-4). La convection naturelle s'établit plus facilement dans une structure avec empilement vertical des colis.

[141] Dans ECC, les colis CSD-C sont manutentionnés par groupes pour réduire les flux, mais sans être regroupés dans des paniers ou casiers.

[142] Dans le cas d'un colis poussé dans un tube (pour un concept d'entreposage souterrain), il faudrait augmenter le diamètre du tube pour disposer de l'espace nécessaire.

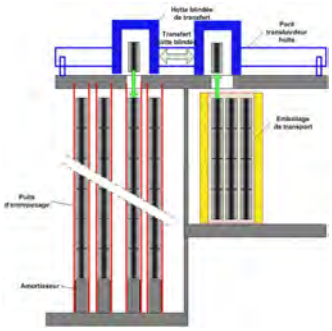


Figure 6.2-1 Colis empilés verticalement : en puits à gauche, en conteneur à droite

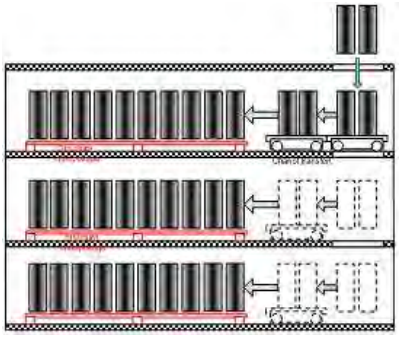


Figure 6.2-2 Colis posés verticalement sur un plancher de bâtiment

Figure 6.2-3 Colis posés verticalement dans une galerie

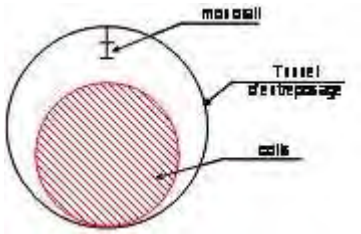


Figure 6.2-4 Colis posé horizontalement

6.2.1.2 Entreposage des colis HA avec regroupements

Un regroupement de colis est pratiqué dans d'autres pays avec l'entreposage des colis de déchets HA vitrifiés en emballages de transport, ainsi que dans l'option d'entreposage modulaire de type Nuhoms® développée pour les combustibles usés (cf. chapitre 3). En effet, dans ces deux cas, les colis sont assemblés dans un panier. Dans le cas de l'emballage de transport de colis HA, le panier n'a ni fonction de préhension de l'ensemble des colis, ni fonction d'étanchéité ; son rôle est le maintien géométrique des colis dans l'emballage de transport en conditions normales et accidentelles de transport. Dans le cas Nuhoms®, le panier est un conteneur métallique soudé étanche qui permet de manutentionner l'ensemble des combustibles usés contenus.

Un ensemble d'options de regroupement de colis HA peut être envisagé en lien avec les diverses architectures possibles des modules d'entreposage :

- regroupement dans un casier sur un seul niveau (Figure 6.2-5) ;
- regroupement dans un panier sur 2 niveaux superposés verticalement (Figure 6.2-6) ;
- regroupement dans un panier sur 4 niveaux superposés, avec le panier placé horizontalement (Figure 6.2-7).

Les structures de regroupement sont a priori des éléments non réutilisables et donc assimilables à tous les équipements fixes de l'entreposage. Elles impactent donc le coût global d'approvisionnement matière. Elles constituent un déchet potentiel à gérer en fin d'exploitation.

Cependant, la construction de telles structures pourrait employer de l'acier recyclé en provenance du démantèlement d'installations nucléaires[143], comme celle de certains équipements fixes peu exposés à la corrosion. Dans ce cas, il n'y aurait pas d'accroissement du volume de déchets global à gérer.

[143] A titre d'exemple, le démantèlement de l'usine d'enrichissement Georges Besse 1 à Pierrelatte (Eurodif) génèrera de grandes quantités d'acier qui justifient l'étude d'un recyclage.

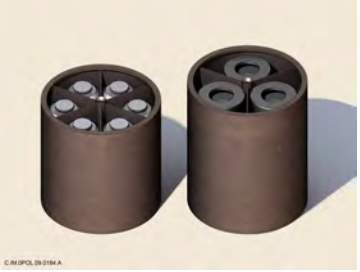


Figure 6.2-5 Casier d'entreposage vertical (1 étage de 6 colis primaires)

Figure 6.2-6 Panier d'entreposage vertical : (2 étages de 6 colis primaires)

Figure 6.2-7 Panier d'entreposage horizontal de type Nuhoms®

Forme et dimensions de la structure de regroupement

Une géométrie cylindrique favorise les échanges thermiques et la résistance mécanique.

La hauteur de la structure est un multiple de la hauteur du colis, variant suivant les options de 1 à 4. Son diamètre est déterminé par les arrangements possibles de colis à l'intérieur, en recherchant une optimisation du remplissage et en tenant compte de la chaleur à évacuer.

Les emballages de transport ont démontré la possibilité d'un remplissage avec 7 colis primaires de type CSD-V dans un diamètre de 1 349 mm (valeur de cavité interne de l'emballage TN81 développé par Areva TN International), soit un aménagement comprenant 6 CSD-V disposés en couronne et un CSD-V central. Cette démarche définie pour le diamètre de 430 mm du CSD-V peut être appliquée aux autres diamètres de colis primaires.

Les diamètres des colis de stockage, de 600 à 655 mm, permettent d'envisager leur regroupement dans un panier ou casier de même diamètre que celui des colis primaires correspondants (1 350 mm environ pour les CSD-V) mais en nombre réduit (3 colis de stockage).

Dans une optique de polyvalence colis primaires/ colis de stockage, la solution de regroupement offre ainsi une grande souplesse[144] d'exploitation vis-à-vis des équipements fixes et du génie civil de l'installation d'entreposage.

Impact du mode d'évacuation de la chaleur

Le regroupement densifie le réseau de colis entreposés, ce qui peut conduire à une augmentation des températures. Selon la capacité d'évacuation de chaleur de l'installation, cela pourra limiter le nombre de colis regroupés dans une même structure, notamment pour un refroidissement en convection naturelle (voir infra). Cela limite aussi le champ d'application de certaines options à des déchets qui auraient déjà eu une première phase de décroissance thermique avant leur accueil dans l'entrepôt.

Dans des architectures d'entreposage en puits verticaux, la thermicité des colis conduit à ramener la densité de colis par casier ou panier de 7 à 6, en renonçant au CSD-V central qui risquerait d'être moins bien refroidi.

Choix de structures de regroupement ouvertes ou fermées

Le choix entre structures ouvertes ou fermées dépend de l'approche du refroidissement et du confinement des déchets. Une structure ouverte peut favoriser la circulation de l'air et les échanges thermiques. L'écran thermique que constituerait une structure de regroupement fermée apparaît plus facile à gérer avec un refroidissement par convection forcée (voir infra).

[144] Cette souplesse se fait avec un léger détriment par rapport à un entrepôt dédié aux seuls colis de stockage type C1, qui pourrait accueillir un panier/casier de 4 colis de stockage dans un diamètre de 1 490 mm (vs 3 colis dans un diamètre de 1 350mm).

Une structure ouverte (ou ajourée) peut permettre d'effectuer une surveillance des colis sans les extraire de leur structure de regroupement. A contrario, une structure fermée amène une contrainte supplémentaire pour une surveillance individualisée des colis.

Positionnement

Le choix d'un positionnement vertical ou horizontal des structures de regroupement est relié au mode d'évacuation de la chaleur.

Un positionnement horizontal a été exploré dans la première phase d'études. Il apparaît plus complexe à gérer, et seule la solution de type Nuhoms® a fait l'objet d'une étude de faisabilité.

Un positionnement vertical présente l'avantage de faciliter le refroidissement en convection naturelle. Il permet un empilement des structures.

Manutention

Le regroupement des colis dans un casier ou un panier constitue une opération de manutention supplémentaire, qui s'ajoute à la mise en place dans l'entrepôt.

Il réduit ensuite le flux d'objets à mettre en place, mais cela devrait avoir un effet peu significatif sur l'exploitation pour les flux de colis considérés dans les études (environ trois colis par jour d'exploitation).

Une fois placés dans la structure de regroupement, les colis entreposés ne sont plus sollicités mécaniquement, ce qui présente un net intérêt :

- Pendant toute la durée de conservation en entreposage, le colis primaire n'est soumis à aucun chargement mécanique autre que son propre poids. En cas d'empilement, ce sont les structures de regroupement, remplaçables, qui reprennent les charges.
- En cas de chute ou de collision lors de la mise en place dans l'entrepôt, c'est la structure de regroupement qui supporterait le choc, facilitant le maintien de l'intégrité mécanique et de la géométrie des colis. Suivant la masse de la structure de regroupement, il est envisageable, si nécessaire, de l'équiper d'un amortisseur de chute en face inférieure.

Le regroupement des colis entraîne une augmentation du volume des unités à manutentionner, et par conséquent une augmentation de la masse de la hotte de protection radiologique, si le transfert a lieu hors cellule irradiante. En tout état de cause, il serait possible d'adapter l'installation pour assurer l'ensemble des transferts dans des cellules de haute activité, selon le principe mis en œuvre par exemple dans Cascad ou plus récemment sur HABOG aux Pays-Bas (cf. chapitre 3). La masse dépend naturellement du diamètre et de la hauteur de la structure de regroupement.

6.2.1.3 Choix des modes de manutention et de positionnement des colis

Dans la première sous-phase d'études, de nombreuses configurations ont été examinées, aussi bien en entreposage unitaire qu'avec diverses structures de regroupement. Des paniers à 4 étages ne sont présentés que dans des solutions originales telles que la solution de type Nuhoms® ou les applications d'entreposage en emballage de transport. Les deux autres solutions de regroupement avec 1 ou 2 étages sont par contre présentées dans diverses options en surface et à faible profondeur.

Chacune des deux approches permet d'optimiser certaines performances qui lui sont propres. Elles peuvent donc toutes deux être envisagées pour la définition d'options de conception d'entreposage.

L'approche classique de manutention et d'entreposage unitaire de colis HA est performante. Elle est réalisée industriellement dans les entrepôts existants. Elle permet de traiter des colis HA de puissance thermique élevée (2 000 W), y compris avec refroidissement par convection naturelle (type E-EV-SE). Cette approche constitue donc une solution robuste pour la définition de futures options de conception d'entreposage.

Une solution avec regroupement de colis est une approche novatrice possible et intéressante, d'autant plus que la puissance thermique des colis en entrée peut être réduite dans certains scénarios d'entreposage (typiquement de l'ordre de 1 000 W). Cette approche facilite une reconversion rapide des installations d'entreposage de colis primaires en entreposage de colis de stockage. L'investissement dans les structures de regroupement génère un surcoût, mais il permet d'apporter une protection mécanique au colis entreposé pendant toute la durée de l'entreposage (pas d'effort mécanique statique à long terme cumulé avec la thermique, protection du colis contre un endommagement lors des manutentions et surtout en cas de chute).

Il a été décidé d'approfondir l'étude de telles options novatrices pour mieux qualifier leur intérêt et leur domaine de validité. Les trois configurations de paniers et casiers présentées plus haut ont été couvertes par les études de faisabilité.

Il est à noter que l'option du regroupement ne résout pas en elle-même le risque de corrosion, qui renvoie à la maîtrise des conditions de l'air ambiant.

6.2.2 Evacuation de la chaleur

Le choix d'options de conception sur le plan thermique résulte d'une part de la puissance thermique à évacuer et d'autre part des exigences de températures maximales à respecter sur les colis et sur les structures (cf. chapitre 5).

6.2.2.1 Modes possibles d'évacuation de la chaleur

Le rayonnement, la conduction et la convection sont les trois modes possibles d'évacuation de la chaleur des colis vers l'environnement.

<u>Transfert par rayonnement</u>

Dans le transfert par rayonnement, l'énergie transmise entre deux corps est définie par la formule de Stefan Boltzmann :

$$E_{Rayonnement} = e\ s\ F\ A\ (T_1^4 - T_2^4)$$

avec :

- E = puissance transmise par rayonnement.
- e = émissivité du matériau (sans unité). *Dans le cas idéal ("rayonnement du corps noir"), e vaut 1.*
- s = constante de Stefan-Boltzmann : 5,67 10^{-8} $W.m^{-2}.K^4$.
- Ti = températures (en Kelvin) des deux corps rayonnants.
- A = aire des surfaces en regard (en m²).
- F = coefficient de vue des surfaces en regard (sans unité). *F est un facteur géométrique calculé en fonction de la distance et de l'orientation respective entre les surfaces échangeant de la chaleur par rayonnement. Il est égal à 1 pour des surfaces planes et parallèles.*

Le transfert par rayonnement permet d'évacuer un flux de chaleur significatif sur un corps récepteur, qui doit à son tour la dissiper. Son efficacité est liée à l'émissivité du matériau du corps émetteur, aux surfaces en regard et à la température du corps récepteur. En pratique, le transfert par rayonnement est adopté comme un moyen complémentaire de refroidissement, qui apporte une marge de dimensionnement.

Transfert par conduction

Le transfert de chaleur par conduction se fait au sein d'un corps sous l'effet d'un gradient de température, et par contact entre deux corps présentant un écart de température.

Le flux de chaleur qui passe par conduction dans un solide peut s'exprimer de la manière suivante :

$$Q^{\circ} = -\lambda . A_{nx} \frac{dT}{dx}$$

avec :

- Q° : flux de chaleur.
- λ : conductibilité thermique du matériau (en W. $m^{-1}.K^{-1}$).
  Nota : La conductibilité thermique de l'inox est de 26 W. $m^{-1}.K^{-1}$, et celle de l'acier de 46.
- A_{nx} : surface perpendiculaire à l'axe de transfert du flux de chaleur.
- T : température (en K).
- x : axe de transfert du flux de chaleur considéré.

La conductibilité thermique des aciers est élevée. Même avec des surfaces réduites[145], la conduction sur de tels matériaux permet un bon transfert d'énergie, sous réserve de pouvoir maintenir un fort gradient de température, et donc de disposer d'une source froide.

Le transfert par conduction est notamment utilisé dans les emballages de transport. Il permet de transférer la chaleur des colis vers des ailettes qui sont elles-mêmes refroidies par convection. Ce cas illustre le couplage d'un transfert par conduction et d'un refroidissement par convection, la convection contrôlant la température aux limites du système de transfert par conduction.

Avec les puissances thermiques des colis de déchets HA considérées, le transfert par conduction ne permet pas d'éviter un refroidissement du module d'entreposage par convection. Comme le rayonnement, la conduction ne peut intervenir que comme un complément dans les gammes de flux étudiées (a minima 200 W.m^{-2}).

Il est à noter que la conduction est au contraire privilégiée pour la dissipation de la chaleur dans le stockage en formation géologique profonde. Mais cela implique que la puissance thermique des colis ait suffisamment décru au préalable en entreposage (cf. chapitre 4).

Transfert par convection

La convection constitue le mode de refroidissement principal des modules d'entreposage pour l'ensemble des options techniques identifiées au cours de la première phase d'études d'ingénierie.

La dissipation de chaleur par convection se fait entre un corps solide et un corps fluide présentant un écart de température. Le transfert d'énergie vers le corps fluide provoque un mouvement de molécules dans le fluide. L'augmentation de température du fluide réduit sa masse volumique, ce qui conduit à une montée verticale par poussée d'Archimède. Son refroidissement conduit au phénomène inverse.

La convection naturelle est générée par le gradient thermique. La convection peut être forcée par un dispositif mécanique qui assure la mise en mouvement du fluide.

[145] La forme cylindrique des colis HA est défavorable à un tel mode de transfert de chaleur, car elle limite les surfaces de contact.

Le refroidissement par eau est largement utilisé pour l'entreposage des combustibles usés (cf. chapitre 3). Le combustible nucléaire est en effet conçu pour être utilisé sous eau. Pour les colis de déchets HA, la situation apparaît différente. L'efficacité du refroidissement par eau est supérieure à celle du refroidissement par air (gain d'un facteur 20 environ), mais elle impose de gérer cette eau sur la durée d'entreposage. Ainsi, les stockages en piscine nécessitent une peau métallique inoxydable afin d'éviter tout risque de fuite d'eau dans le béton. Par ailleurs le choix de l'eau comme fluide de refroidissement génèrerait des risques de corrosion des conteneurs. L'acier inoxydable des conteneurs primaires serait en effet soumis à un risque de piqûration par corrosion radiolytique.

Dans les installations existantes, le refroidissement des modules d'entreposage de colis de déchets HA s'effectue par convection d'air prélevé puis rejeté à l'extérieur, fonctionnant en circulation naturelle ou forcée. Ce mode d'évacuation de la chaleur apparaît en général comme la solution optimale.

6.2.2.2 Alternative entre convection naturelle ou forcée

Les échanges de chaleur par convection sont modélisés par la loi de Newton :

$$\Phi = h\ S\ (Ts - Ta),$$

avec

- Φ le flux de chaleur,
- h, le coefficient d'échange (en $W.m^{-2}.K^{-1}$),
- S, la surface d'échange,
- Ts, la température à la surface,
- Ta, la température de l'air

Le flux de chaleur évacué est proportionnel à l'écart de température entre la surface du colis et l'air qui passe à son contact.

<u>Convection naturelle</u>

En convection naturelle, le moteur de la circulation de l'air est la puissance thermique captée. Pour que cette circulation d'air s'établisse véritablement, il faut s'assurer que ce moteur peut vaincre les résistances aérauliques dans l'installation[146] (cf. chapitre 8).

Un refroidissement par convection naturelle suppose l'établissement d'un régime permanent de circulation d'air. Il faut en outre disposer d'un débit de refroidissement suffisant pour ne pas dépasser les critères de température maximale dans les colis et les structures.

Les solutions techniques consistent à canaliser l'air, l'échauffer le plus possible par rapport à l'air frais ambiant et si nécessaire augmenter la différence de pression entre l'admission d'air frais et le point de rejet atmosphérique de l'air chaud au moyen d'une cheminée[147]. Les pertes de charge des circuits d'air doivent naturellement être minimisées.

Un système de convection naturelle est passif, car il ne nécessite pour fonctionner aucune source d'énergie autre que la puissance thermique des colis. Cela ne signifie pas l'absence d'entretien ni de surveillance. Il faut par exemple s'assurer de l'absence de colmatage des entrées d'air.

[146] L'efficacité du refroidissement en convection naturelle doit être vérifiée dans les différentes configurations possibles de chargement du module d'entreposage, notamment pour des remplissages partiels. Elle est sensible aux variations de température de l'air ambiant, qui doivent donc être prises en compte. La démonstration repose sur des simulations. Elle peut aussi demander des maquettes de validation dans des cas particuliers d'écoulement d'air complexe.

[147] La hauteur de cheminée contribue aux performances de refroidissement en augmentant le débit d'air.

Convection forcée

La comparaison des performances thermiques de la convection forcée et de la convection naturelle repose sur l'évaluation du coefficient d'échange h de la loi de Newton. Ce dernier dépend des caractéristiques du fluide, de la géométrie et du régime d'écoulement, laminaire ou turbulent. En convection forcée, il peut être déterminé expérimentalement pour une architecture donnée. Il est calculé en fonction du nombre de Nusselt qui s'exprime en fonction du nombre de Reynolds, donc de la vitesse, masse volumique et viscosité du fluide, et du nombre de Prandtl.

Les déterminations expérimentales montrent que la convection forcée augmente d'un ordre de grandeur le coefficient d'échange par rapport à la convection naturelle. La convection forcée ouvre la possibilité d'introduire des dispositifs augmentant les pertes de charge aérauliques mais susceptibles d'apporter des bénéfices : conditionnement de l'air entrant, filtration de l'air extrait, récupération de l'énergie thermique.

6.2.2.3 La question du contact entre les colis et l'air de refroidissement

La mise en œuvre du refroidissement d'un module d'entreposage par convection d'air en circuit ouvert pose la question du contact des colis avec l'air atmosphérique. En effet l'humidité relative de l'air au contact des colis doit être contrôlée pour éviter les risques de corrosion.

Un refroidissement par convection naturelle en circuit ouvert impose en pratique une séparation physique entre le colis et l'air de refroidissement extérieur. Le transfert de chaleur entre les colis et l'air de refroidissement du module d'entreposage peut alors s'effectuer par un circuit primaire.

Ce circuit primaire peut être fermé ou quasi fermé[148], et fonctionner par boucles convectives naturelles ou forcées, rayonnement et conduction. Un tel principe de refroidissement est déjà mis en œuvre industriellement dans l'installation E-EV-SE.

Une application originale en entreposage consiste à refroidir un circuit primaire quasi-fermé fonctionnant en convection d'air forcée par des échangeurs air/eau. Les frigories du réseau d'eau abaissent la température de l'air du circuit primaire. L'eau du deuxième circuit restitue la chaleur à l'environnement, par exemple dans des tours aéroréfrigérantes. Cette option a été proposée particulièrement pour une construction de l'entrepôt à faible profondeur. Les échangeurs permettraient de limiter considérablement la quantité d'air à admettre au sein de l'entreposage, et à conditionner au plan hygrométrique. Les circuits d'eau pourraient être implantés en dehors de la zone d'entreposage proprement dite de façon à éviter qu'une fuite éventuelle n'augmente l'humidité relative de l'air de la zone d'entreposage.

A l'inverse de la convection naturelle, la convection forcée autorise un apport direct d'air atmosphérique au contact des colis. Pour maîtriser les conditions hygrométriques au contact des colis, il est possible de réutiliser l'air chaud pour réchauffer l'air entrant et abaisser son humidité relative. On constitue alors un circuit ouvert avec recirculation partielle.

6.2.2.4 Choix de mode d'évacuation de la chaleur

L'examen des différents modes possibles de refroidissement n'a pas mis en exergue de procédé innovant répondant convenablement à l'ensemble des contraintes. Le procédé classique de refroidissement par convection d'air demeure la solution à retenir.

Les solutions avec convection naturelle peuvent être privilégiées par rapport à la convection forcée, car elles améliorent le caractère passif de l'entreposage et réduisent les coûts d'exploitation.

[148] Une faible part de l'air est renouvelée pour assurer une évacuation de gaz potentiellement formés par radiolyse dans ce circuit primaire.

Cependant, il faut s'assurer de la mise en place d'une architecture adaptée et de solutions pour protéger les colis et les structures du risque de corrosion oxydante avec l'humidité de l'air atmosphérique[149].

Aussi les deux approches de refroidissement par convection naturelle et convection forcée ont été retenues pour des études de faisabilité, ainsi que l'option originale avec convection forcée en air et refroidissement par échangeurs air/eau dans le cadre spécifique d'une option de conception à faible profondeur.

6.2.3 Architectures d'entreposage des déchets HA

L'architecture d'une installation d'entreposage se caractérise par les modalités de juxtaposition des colis entreposés ou des structures de regroupement : empilement vertical ou alignement horizontal.

Pour une implantation en surface, elle renvoie classiquement au génie civil des bâtiments.

Dans une hypothèse de construction à faible profondeur, elle doit aussi intégrer les contraintes géotechniques et hydrogéologiques de l'environnement souterrain, et les possibilités techniques des méthodes de creusement.

La résistance mécanique de la roche et la profondeur déterminent les volumes de béton nécessaires au soutènement, et peuvent limiter les dimensions des excavations.

Si la formation hôte n'est pas suffisamment peu perméable vis-à-vis de risques de venues d'eau et de la réalisation d'un confinement statique, l'adoption d'une double enveloppe sur la périphérie des ouvrages permettrait de créer une zone tampon contrôlable entre la structure d'entreposage des colis proprement dite et le terrain. Les études ont retenu cette configuration.

Vis-à-vis de la thermicité des colis de déchets, une construction à faible profondeur limite les écarts de température entre les faces externes et internes des parois de béton, ce qui est favorable. En revanche, le blocage des déformations thermomécaniques par le massif rocheux nécessite davantage de joints de dilatations dans des horizons géologiques très compétents.

Il apparait que les options envisageables en surface et à faible profondeur sont relativement proches lorsque l'architecture des installations est développée verticalement. Par contre, pour les architectures horizontales, les options considérées en souterrain sont spécifiques.

L'entreposage requiert de manière générale d'importantes quantités d'acier pour constituer les armatures des bétons de génie civil. Les armatures confèrent aux structures d'entreposage leur résistance au séisme et aux agressions externes, notamment la chute d'avion. Comme dans le cas des paniers de regroupement de colis mentionné plus haut, ces aciers pourront être recyclés à partir du démantèlement d'installations nucléaires mises à l'arrêt définitif.

6.2.3.1 Architecture verticale en puits

L'architecture verticale en puits est fondée sur un empilement vertical de colis guidé par une structure métallique constituant les puits. Elle est adaptée à un entreposage unitaire des colis CSD-V ou avec des structures de regroupement dont le nombre d'étages est limité à 2.

<u>Agencement des puits d'entreposage</u>

L'agencement des puits d'entreposage constitue un réseau. La définition du réseau vise à obtenir la compacité maximale possible.

[149] L'adoption d'une convection naturelle conduit à séparer les fonctions de refroidissement et de maîtrise de la corrosion des conteneurs et des structures.

Dans un bâtiment en surface ou une construction à faible profondeur à ciel ouvert, le réseau peut-être à pas très serré. Les figures ci-dessous présentent un réseau à pas carré dans une fosse de section rectangulaire et un réseau à pas triangulaire dans une fosse de section cylindrique ou hexagonale.

Dans une implantation en galeries souterraines, la compacité du réseau est imposée par les contraintes géotechniques. A titre d'exemple, la Figure 6.2-10 présente un réseau à pas rectangulaire : dans la direction axiale des galeries souterraines, le pas peut être serré ; dans l'autre direction, il s'inscrit dans le maillage des galeries, lui-même défini par la largeur des stots[150] assurant leur stabilité mécanique.

Les puits d'entreposage sont reliés à la structure du bâtiment à leurs parties supérieure et inférieure[151]. La partie supérieure des puits doit dans tous les cas être raccordée au plancher de desserte qui permet d'assurer l'introduction des colis. Pour la partie inférieure, deux approches sont envisageables : le puits est suspendu, ou le puits est posé au sol.

Le dimensionnement thermomécanique du puits détermine son mode de fixation aux structures porteuses. La solution consistant à transmettre le chargement du puits verticalement au sol est en général privilégiée. Elle nécessite, lorsque la tête du puits est solidarisée avec le plancher de desserte, d'interposer un soufflet de dilatation pour accommoder l'allongement lié à l'échauffement du puits.

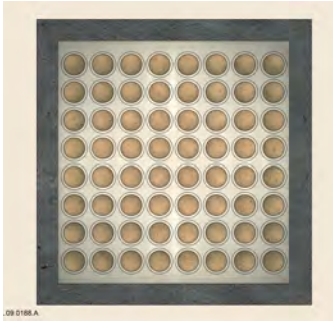


Figure 6.2-8 Réseau à pas carré serré

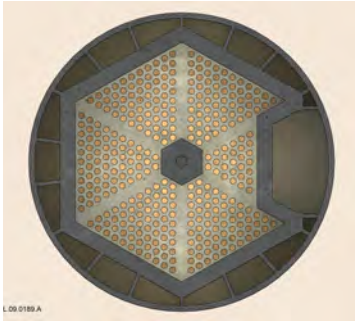


Figure 6.2-9 Réseau à pas triangulaire serré

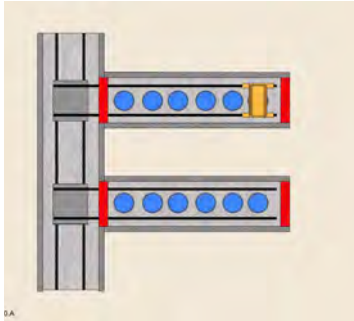


Figure 6.2-10 Réseau à pas rectangulaire (en galeries souterraines)

<u>Puissance thermique de chaque puits, maîtrise du risque de chute et gammes de hauteur explorées</u>

Dans une construction à faible profondeur, si la puissance de la couche géologique le permet, il paraît assez facile d'envisager des puits de grande hauteur (figures ci-dessous). En surface, les études se sont limitées à la hauteur mise en œuvre à E-EV-SE.

En convection naturelle, la puissance maximale par puits est limitée à 24 kW pour des colis primaires et 18 kW pour des colis de stockage. En convection forcée, des options ont été envisagées jusqu'à une puissance de 60 kW avec un seul colis dans la section du puits[152].

La manutention des colis en puits génère un risque de chute. La hauteur de puits est donc limitée par les exigences de tenue mécanique en cas de défaillance de manutention (lâcher de charge par exemple). Ce besoin se traduit le plus souvent dans les solutions par l'incorporation d'une structure d'amortissement en fond de puits, telle que mise en œuvre dans des entrepôts existants (chapitre 3).

[150] Un « stot » est l'espace de massif laissé entre deux ouvrages creusés en souterrain.
[151] En souterrain, le puits pourrait aussi être directement en contact avec le terrain foré sur sa hauteur.
[152] Deux concepts extrêmes avec 12 à 13 empilements de colis primaires en paniers de 12 ont été proposés ; ils conduisent à des puissances unitaires de 288 à 312 kW.

La hauteur d'empilement pourrait ainsi atteindre 19 colis primaires HA dans les options à entreposage unitaire (moyennant la mise en place d'un amortisseur en fond de puits et d'un amortisseur intermédiaire).

Les options avec une structure de regroupement permettent de protéger le colis primaire et justifient l'exploration d'empilements plus hauts (par exemple 13 paniers de hauteur 3,2 m).

Diamètre des puits

Le diamètre des puits est directement lié au choix de regrouper ou non les colis. Les plus petits diamètres correspondent à un entreposage unitaire de colis, soit un diamètre de 0,5 m environ[153]. De plus grands diamètres (Φ 1,4 m à Φ 1,8 m) sont obtenus avec un regroupement des colis dans un panier ou casier.

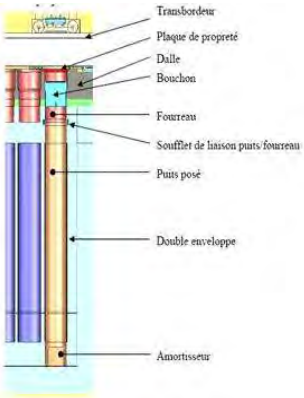


Figure 6.2-11 Puits posés au sol

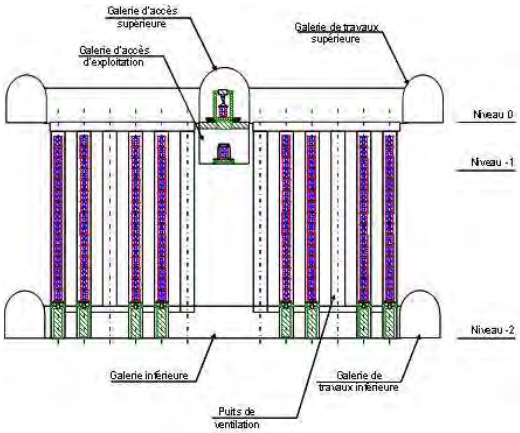


Figure 6.2-12 Galeries à faible profondeur avec puits espacés

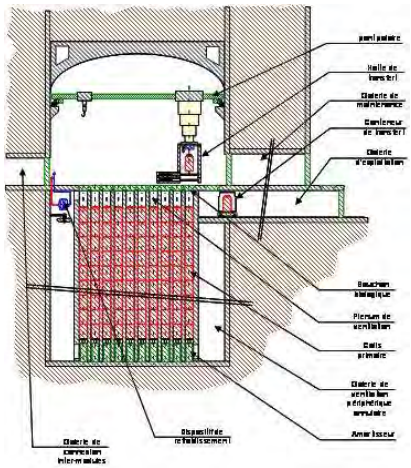


Figure 6.2-13 Puits dans une enceinte cylindrique construite à ciel ouvert

6.2.3.2 Architecture en bâtiment multi-étagé

L'exploration d'une architecture horizontale pour des colis entreposés unitairement conduit à un bâtiment multi-étagé (en général de 4 à 6 étages) desservi par un ascenseur. Une telle architecture est plutôt adaptée à des besoins de grande capacité d'entreposage (plusieurs milliers de colis). Elle n'est envisageable en pratique qu'avec un refroidissement par convection forcée. Il faut en effet assurer un gradient de pression horizontal suffisant dans chaque cellule d'entreposage.

Associer cette architecture à un positionnement horizontal des colis limite la hauteur de chaque étage à environ 2,8 m (Figure 6.2-14).

L'alternative d'un positionnement vertical présente l'avantage d'être plus polyvalente car compatible avec les colis primaires et de stockage, tout en maintenant une hauteur d'étage modeste, soit 3,5 m (Figure 6.2-15). Cette option est appliquée industriellement dans l'installation ECC[154] aux colis CSD-C de la famille F2-3-02, de plus faible puissance thermique (44 W). Elle a été retenue pour une étude de faisabilité, afin d'évaluer la faisabilité et les limites d'une application aux déchets HA.

[153] Ce diamètre peut varier en fonction du type de colis primaire ou de stockage entreposé.
[154] Les dalles planchers de ECC assurent une fonction de découplage neutronique (chapitre 3).

Dans un bâtiment multi-étagé, un regroupement des colis en paniers (tel qu'illustré à la Figure 6.2-16 pour une construction en faible profondeur) n'apporterait pas un bénéfice marquant : pas de gain en polyvalence avec un positionnement vertical, pas de gain de compacité, intérêt moindre vis-à-vis de la manutention du fait de l'absence de levage sur grande hauteur.

6.2.3.3 Architecture sur radier ou en fosse

Plusieurs options d'architectures d'entreposage ont été identifiées en partant du panier des emballages de transport TN28 et TN81 (TN International), regroupant 28 colis CSD-V sur quatre étages.

Une option pratiquée dans d'autres pays (chapitre 3) consiste à utiliser les emballages de transport, de longueur 6,5 m, diamètre 2,3 m et masse 116 t, comme structures d'entreposage. Les emballages sont alors posés sur un radier en surface, dans un bâtiment couvert par un bardage métallique (Figure 6.2-17) ou dans une fosse. Ils peuvent être munis d'un couvercle supplémentaire pour résister à la chute d'avion.

La position verticale est préférée à la position horizontale, car elle permet une meilleure compacité et un refroidissement en convection naturelle plus efficace. Comparée au bâtiment en bardage, la fosse, plus coûteuse, permet d'optimiser le refroidissement et d'apporter une meilleure protection aux risques d'origine externe. Cette option évite une étape de manutention de colis dans le schéma d'ensemble entreposage-transport-stockage. Elle nécessite cependant d'adapter l'emballage de transport à la durée de la période d'entreposage. Elle peut requérir simultanément une autorisation d'entreposage et un agrément d'emballage de transport. Enfin, elle ne facilite pas la surveillance individuelle des colis, la surveillance s'effectuant globalement pour l'ensemble de l'emballage.

D'autres d'options abandonnent l'utilisation du corps de l'emballage de transport pour n'exploiter que le panier de regroupement. La première, la plus modulaire et la plus proche de l'emballage de transport, est dérivée du Nuhoms®, solution appliquée industriellement dans d'autres pays aux combustibles usés : chaque panier est placé horizontalement dans un module individuel de génie civil posé sur radier, qui assure une protection radiologique et un refroidissement par convection naturelle (Figure 6.2-18). Cette option nécessite une installation de transfert et un équipement spécifique pour l'introduction horizontale du panier dans son module d'entreposage. La modularité de ce concept a conduit à le retenir pour en étudier l'application aux déchets HA, au stade de l'étude de faisabilité. L'avantage de la modularité doit néanmoins être pondéré par une grande emprise au sol, qui peut limiter les capacités.

Pour ouvrir la possibilité d'une capacité d'entreposage plus importante, un positionnement vertical des paniers peut être envisagé en fosse dans des modules de génie civil de grandes dimensions.

Une telle architecture présente un intérêt potentiel en étant associée à un refroidissement en convection naturelle (Figure 6.2-19). Le refroidissement peut être optimisé en obturant les emplacements inutilisés et en calibrant le débit d'air canalisé sur le panier. En revanche l'application d'une convection forcée à cette architecture apparaît moins pertinente à cause d'une faible efficacité et de difficultés potentielles de démonstration (Figure 6.2-20).

Le retrait des paniers en fin d'entreposage permet de libérer l'ensemble de l'espace intérieur de l'entrepôt et offre ainsi une possibilité de reconfiguration originale. En revanche les principales difficultés sont une limitation d'accès aux colis pour la surveillance, comme dans les cas précédents, la gestion du risque sismique sur les paniers entreposés verticalement et le fonctionnement des moyens de manutention à la température d'ambiance élevée de l'entrepôt. En termes de service rendu, l'analyse de cette option fait apparaître des similitudes avec les architectures verticales en puits avec paniers, qui lui ont été préférées pour mener les études de faisabilité.

Batiment multi-étagé construit en surface

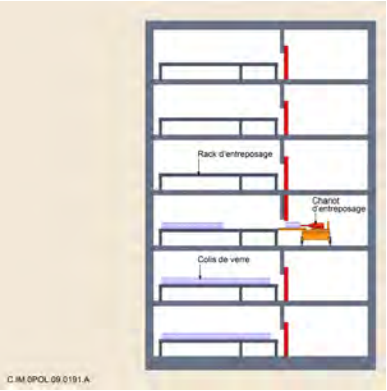


Figure 6.2-14 Colis disposés horizontalement sur un support

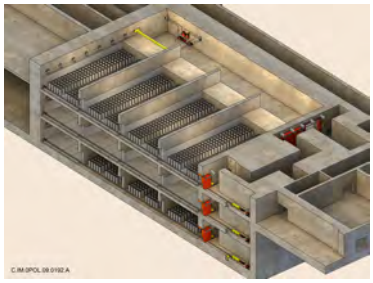


Figure 6.2-15 Colis disposés verticalement en lignes parallèles

Batiment multi-étagé construit à faible profondeur à ciel ouvert

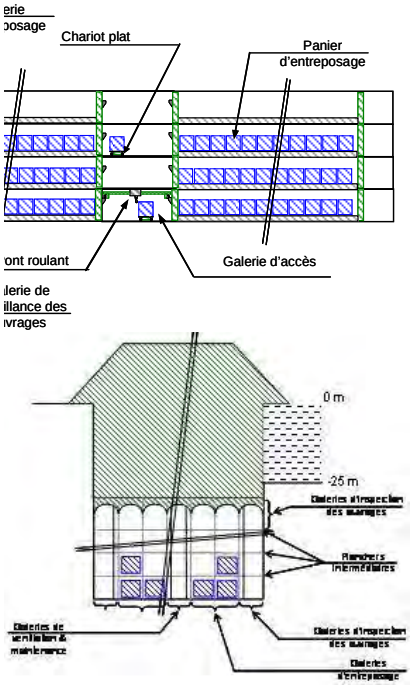


Figure 6.2-16 Colis regroupés en paniers d'entreposage

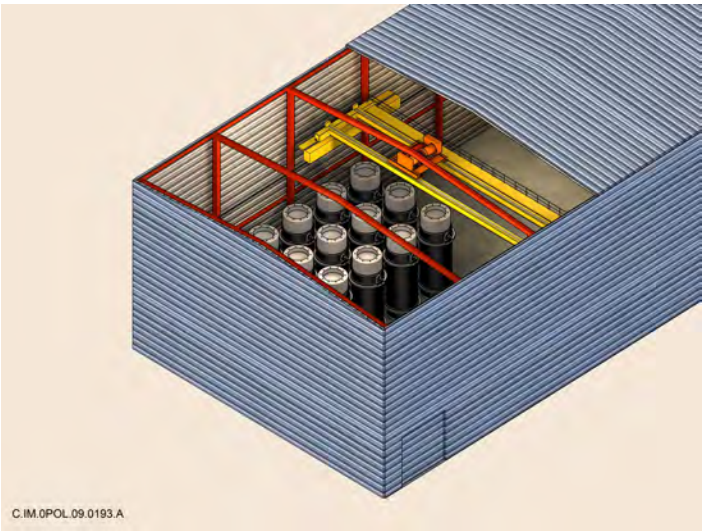


Figure 6.2-17 Entreposage en emballages de transport sur radier

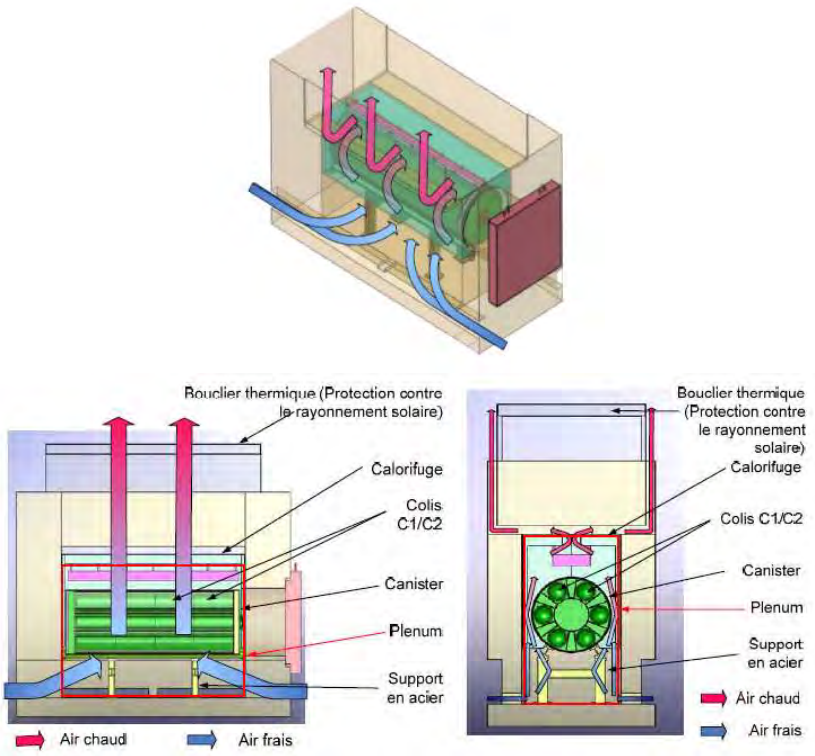


Figure 6.2-18 Entreposage de déchets HA dérivé du Nuhoms®

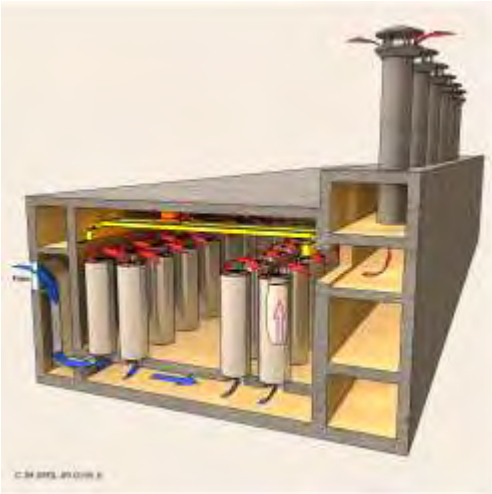


Figure 6.2-19 Entreposage vertical en paniers de 28 colis avec convection naturelle

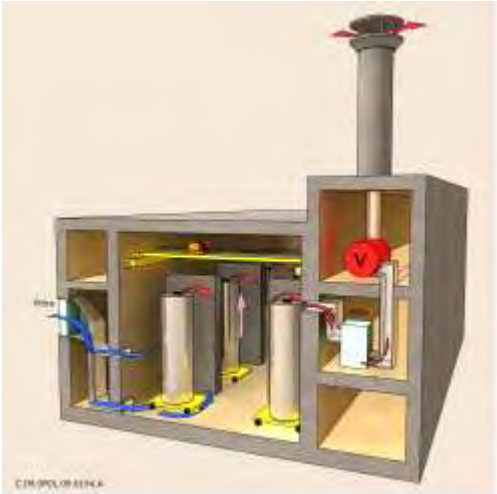


Figure 6.2-20 Entreposage vertical en paniers de 28 colis avec convection forcée

L'application d'une architecture en fosse à des paniers de dimensions réduites (12 colis primaires) mais gerbés a été envisagée. La Figure 6.2-21 présente ainsi une architecture à faible profondeur, avec des paniers ajourés et un système par convection forcée associé à un échangeur air/eau. Une telle architecture serait compatible dans son principe avec des colis de déchets HA et MAVL ; elle a fait l'objet d'une étude de faisabilité pour les déchets MAVL (cf. chapitre 7).

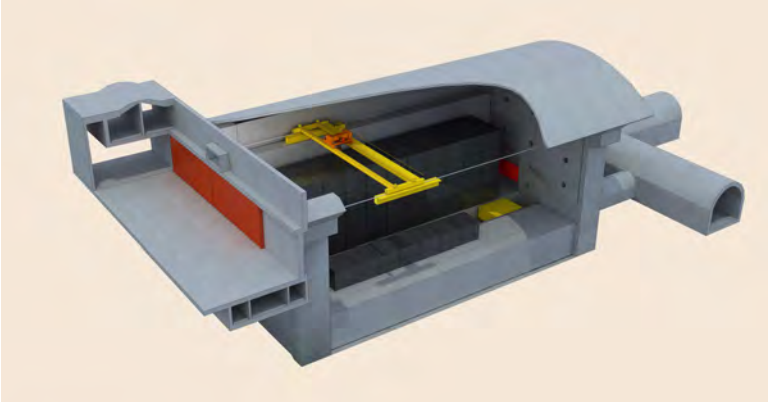


Figure 6.2-21 Entreposage en fosse avec paniers gerbés

6.2.3.4 Architecture horizontale en galeries souterraines

Si une construction en surface ou à faible profondeur à ciel ouvert offre une grande latitude géométrique à la définition des structures de génie civil, une réalisation en galeries souterraines peut être plus contrainte par les méthodes de réalisation. Partant du contexte géologique étudié en Meuse/Haute Marne pour Cigéo, il a été retenu d'étudier la faisabilité d'une architecture horizontale en galeries creusées dans une formation calcaire comparable à l'horizon K1 de l'Oxfordien.

Deux grandes familles de méthode de creusement se distinguent :

- L'abattage à l'explosif ou par attaque mécanique ponctuelle offre plus de flexibilité sur l'architecture souterraine, avec la possibilité de galeries de longueurs modérées et d'intersections à angle droit (Figure 6.2-22).
- Le creusement au tunnelier est contraint par sa technologie : les galeries creusées par un tunnelier sont de diamètre constant, et leur longueur doit être maximisée pour rentabiliser le tunnelier. Dans ces conditions, cette méthode peut être particulièrement performante au plan des délais de réalisation et des coûts. Il est alors possible de réaliser de longues galeries[155] droites ou avec un grand rayon de courbure (typiquement un rayon de courbure de 100 m pour un diamètre de galerie utile de 4,5 m).

L'adaptation de l'architecture à un creusement au tunnelier conduit à définir un cheminement continu du creusement :

- Une première approche originale est illustrée à la Figure 6.2-23. Une galerie d'entreposage enroulée en spirale est recoupée régulièrement par une galerie d'exploitation équipée de puits d'accès à chaque intersection. Dans cette approche, cinq colis sont posés verticalement dans la section de galerie. La ventilation de refroidissement des colis est effectuée en pleine section depuis la galerie d'exploitation jusqu'à un puits d'extraction.
- La seconde approche originale illustrée à la Figure 6.2-24 vise à réaliser la galerie d'exploitation et les galeries d'entreposage par un même tunnelier (diamètre 4,5m), grâce à un enchaînement de lignes droites et de courbes en S. Les galeries d'entreposage sont alors en majeure partie de forme courbe, et accueillent des paniers d'entreposage de 12 colis primaires (4 x 3). La chaleur est évacuée par un circuit de refroidissement implanté dans une galerie située au-dessus de la galerie d'entreposage, à laquelle elle est reliée.

[155] La mise en œuvre d'un tunnelier nécessite de créer au préalable une grande chambre de montage en tête de chaque galerie à réaliser ; l'installation de la machine peut alors prendre 2 à 3 mois. De ce fait, cette technique ne s'applique qu'à des ouvrages de grandes longueurs continues à un diamètre constant ou presque.

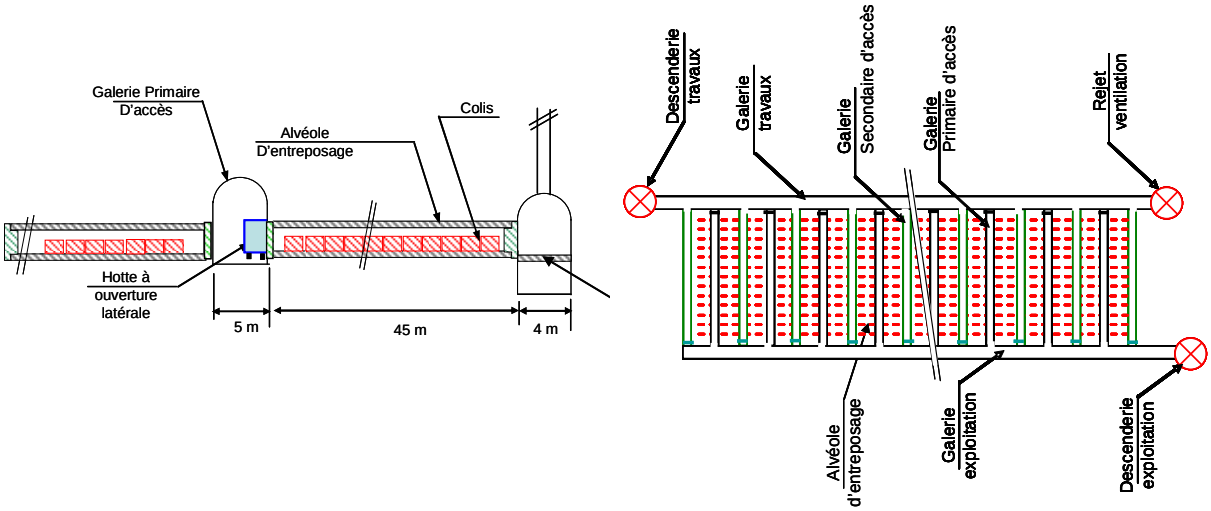


Figure 6.2-22 Architecture horizontale en galeries creusées à l'explosif ou par attaque ponctuelle

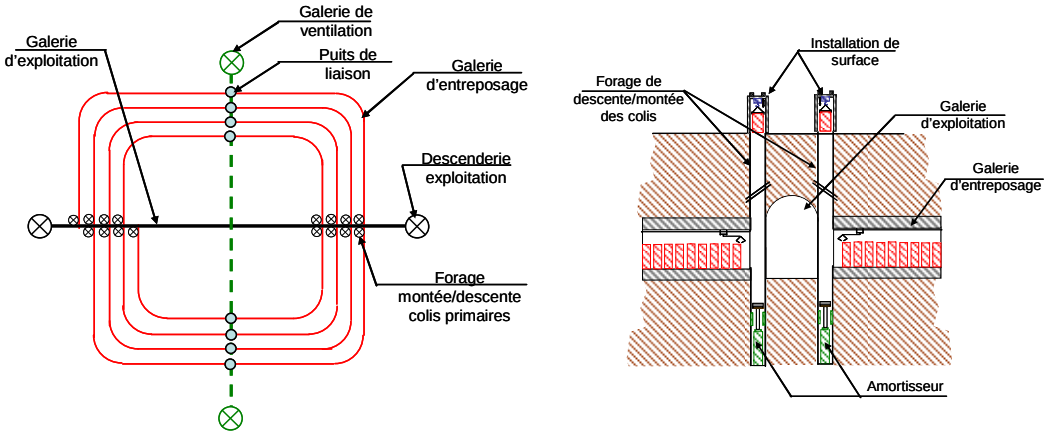


Figure 6.2-23 Architecture horizontale en galeries en spirale creusées au tunnelier (avec coupe sur puits d'accès en vue de droite)

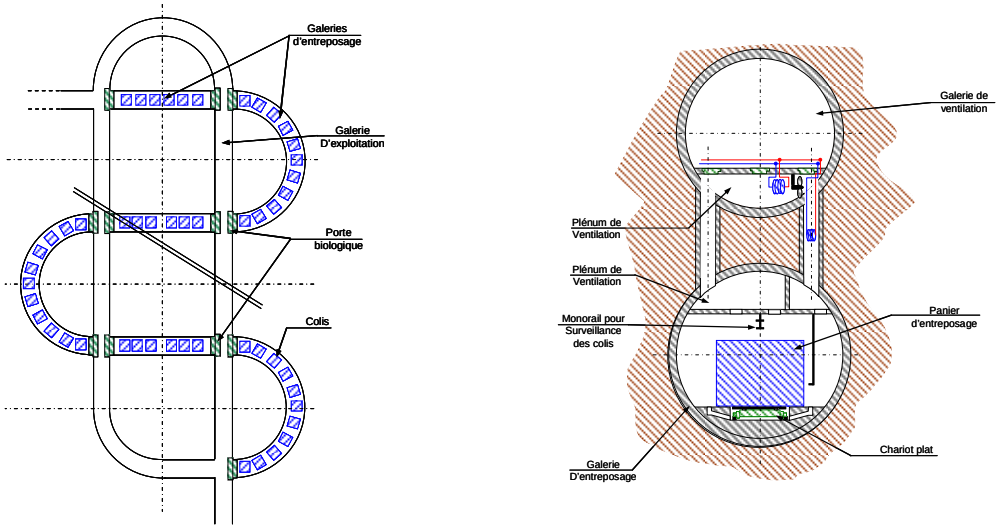


Figure 6.2-24 Architecture horizontale en galeries courbes creusées au tunnelier (avec deux niveaux : un niveau d'entreposage et un niveau de ventilation)

6.2.4 Les possibilités de surveillance

Le choix d'options techniques et la définition d'une architecture d'entreposage doivent prendre en compte des besoins de surveillance des colis entreposés et de l'installation.

En complément à la surveillance classique permettant de s'assurer du maintien permanent de l'installation d'entreposage dans son domaine de fonctionnement autorisé, le chapitre 5 a introduit le principe d'une surveillance (ou observation) de moyen et long terme associée aux objectifs de maintien de la qualité des colis et de durabilité de l'entreposage. Elle peut nécessiter la mise en œuvre de moyens d'auscultation spécifiques.

6.2.4.1 Surveillance des colis de déchets HA entreposés

La surveillance des colis de déchets HA entreposés s'attache particulièrement au maintien de la qualité du confinement des substances radioactives par le conteneur et le verre nucléaire.

Cela suppose un suivi continu de :

- la température du verre au cœur du colis, pour vérifier le respect de la limite fixée au chapitre 5 ; n'étant pas directement accessible, cette température pourra être évaluée indirectement à partir d'autres grandeurs mesurables ;
- l'hygrométrie de l'air au contact du conteneur (conteneur primaire en acier inoxydable ou conteneur de stockage en acier non ou faiblement allié) pour en éviter ou limiter la corrosion ;
- l'absence de dissémination radioactive.

La conception de l'entrepôt devrait ainsi faciliter la mise en œuvre de techniques de mesure continue de ces paramètres.

En particulier, la contamination potentielle pourra être mesurée sur les circuits de refroidissement ou sur des circuits de balayage spécialement dédiés à la surveillance[156].

L'adoption de circuits primaires fermés ou quasi-fermés est particulièrement favorable de ce point de vue. On notera que la possibilité d'une surveillance de la contamination de l'air au contact des colis primaires, offerte par ce type d'option, peut apporter un degré de confiance supplémentaire.

En complément à un suivi continu, un prélèvement par sondage de colis entreposés et leur contrôle permettraient de conforter la validité du programme de surveillance. Les paramètres susceptibles d'être ainsi contrôlés directement sont l'état physique du conteneur (absence de corrosion et maintien d'étanchéité), l'évolution de sa contamination surfacique labile[157] (qui doit rester inférieure à 4 $Bq.cm^{-2}$ en $\beta\gamma$ et 0,4 $Bq.cm^{-2}$ en α, cf. chapitre 5), la température de peau et le débit de dose. La mesure des deux derniers paramètres confirmerait l'évolution radiologique et thermique du colis par rapport aux prévisions, dans la perspective d'une mise en stockage.

Une surveillance par prélèvement de colis suppose une accessibilité raisonnable à tous les colis entreposés. Une marge d'appréciation demeure cependant sur le nombre de colis à déplacer ou la durée nécessaire pour atteindre un colis quelconque. Aussi les performances et limites de chaque option envisageable au regard de ces paramètres demandent à être caractérisées.

---

[156] Dans E-EV-SE, la surveillance de la qualité du confinement des substances radioactives contenues dans les colis est assurée par mesure de la contamination éventuelle de l'air de balayage extrait des puits fermés. Un contrôle des effluents gazeux est effectué avant leur rejet atmosphérique.

[157] Il y a deux origines potentielles de contamination de l'air pendant l'entreposage : une contamination surfacique externe initiale du colis qui serait ou deviendrait labile, et une contamination qui découlerait d'une perte d'étanchéité du conteneur. Cependant, dans le cas des colis de déchets HA vitrifiés, il n'est pas évident qu'une telle perte d'étanchéité conduise à une dissémination : en effet, le piégeage des substances radioactives dans le verre peut être garanti par les conditions d'entreposage (particulièrement l'absence de risque de lixiviation). Le risque de dissémination serait donc associé essentiellement à une contamination fixée sur le colis qui deviendrait labile avec le temps.

Afin de limiter les contraintes d'exploitation, une partie des objectifs potentiels d'une surveillance par prélèvement de colis peut aussi être atteinte au moyen du suivi périodique d'échantillons témoins disposés dans l'entrepôt dans des situations représentatives des colis. L'observation des risques de corrosion des conteneurs entre dans cette possibilité.

Suivant les options, des contrôles complémentaires de points particuliers pourraient être envisagés : ainsi, les surfaces de contact du colis en entreposage sont susceptibles de définir des points singuliers (gradients locaux de température pour un colis posé au sol par exemple).

La plupart des techniques d'acquisition nécessaires à la surveillance des colis en entreposage sont aujourd'hui éprouvées : sondes de température (type PT 100), caméras thermographiques, débitmètres, prélèvements d'air ou frottis sur colis pour contrôle de non contamination, capteurs d'humidité, contrôles de débit de dose sur colis.

6.2.4.2 Surveillance de l'installation

Les équipements de manutention et de ventilation ainsi que les réseaux (courants forts et contrôle commande) feront l'objet d'un suivi régulier et d'une surveillance qui donneront lieu à des remplacements lorsque nécessaire pour la longévité de l'installation (jouvence). Cette surveillance classique, qui bénéficie d'un large retour d'expérience dans l'industrie nucléaire, n'est pas développée dans la suite.

Dans une optique de durabilité, la surveillance de l'installation pourra s'attacher aussi aux structures porteuses du génie civil. Il s'y ajoute les flux d'eau susceptibles de provenir du terrain, de l'air atmosphérique ou de l'entrepôt lui-même.

Une surveillance des structures porteuses en béton du génie civil nécessite d'abord la détermination d'un état initial, par rapport auquel les observations futures pourront être comparées. Cet état initial repose sur un suivi détaillé des étapes de construction et sur le contrôle de fabrication. Les observations consisteront ensuite à suivre le vieillissement et à détecter d'éventuelles anomalies de comportement localisées : progression de la carbonatation du béton, pénétration éventuelle d'ions chlorure dans le béton, risque de dépassivation des armatures et corrosion, altération de surface et fissuration, déformations internes et externes des éléments fortement sollicités, tassement des appuis. Les éventuels cyclages thermique et hygrométrique auxquels les structures pourront être soumises devraient aussi être suivis et enregistrés, afin de pouvoir corréler les observations.

Une surveillance des structures de supportage, telles que les structures métalliques constituant les puits d'entreposage dans certaines options, consisterait à vérifier l'état de ces structures et à détecter les anomalies éventuelles susceptibles d'influer sur leurs fonctions (présence d'humidité, zones de condensation, développement de corrosion, points chauds).

La surveillance d'une installation met en œuvre d'une part des mesures en continu, d'autre part des inspections effectuées périodiquement[158].

Les mesures pourront reposer sur la pose de capteurs dans certaines parties de l'ouvrage. Il pourra aussi être utile de disposer d'éléments de structure témoins, mis en œuvre sous les mêmes conditions que l'ouvrage principal et exposés tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'installation aux mêmes conditions d'environnement. Ces témoins pourront ainsi faire régulièrement l'objet d'expertises détaillées (résistance mécanique, porosité et perméabilité aux gaz et aux liquides).

Les inspections périodiques peuvent avoir lieu par une intervention humaine ou par l'intermédiaire de systèmes robotisés, notamment pour les zones d'entreposage inaccessibles dans les conditions normales d'exploitation[159].

[158] Les pratiques consistent en des visites de contrôle courant en principe tous les 5 ans, et des visites de contrôle poussé tous les 20 ans ou à la suite d'une anomalie importante.

Il est à noter que dans les options à faible profondeur, la structure la plus externe d'un module d'entreposage est en contact direct avec le milieu géologique et par conséquent moins accessible qu'en surface. L'option d'une double enveloppe visitable ou auscultable à distance en faciliterait la surveillance.

De nombreuses techniques sont disponibles pour assurer la surveillance d'installations d'entreposage :

- Caméras avec endoscope pour vision au sein des puits d'entreposage ;
- Caméra thermographique ;
- Sonde de température (de type PT100) ;
- Débit mètre ;
- Capteurs d'humidité ;
- Capteurs de déformations[160] (cordes vibrantes et jauges de contrainte).

Les travaux de recherche communs au stockage et à l'entreposage visent à développer de nouvelles techniques d'observation et de surveillance afin de compléter cette panoplie de moyens et être intégrées à terme dans un programme de surveillance séculaire d'installation d'entreposage.

6.3 Etude de faisabilité d'une architecture en puits verticaux avec regroupement des colis en casiers

Une première option étudiée durant la deuxième sous-phase de recherche reprend le principe d'architecture de E-EV-SE, modifié par le choix d'un regroupement des colis apportant une certaine polyvalence. Elle s'appliquerait à des colis de la famille F2-3-01 entrant avec une puissance thermique de 1 000 W (après une première période de décroissance dans un autre entrepôt) ainsi qu'aux colis des familles F1-3-02 et F1-4-01.

Les caractéristiques résumées de cette option sont :

- la mise en œuvre d'une structure de regroupement des colis primaires, disposés verticalement par six dans un casier ;
- l'empilement des casiers de colis primaires dans des puits verticaux sur 7 ou 9 niveaux selon le type de colis ;
- un refroidissement des puits par convection naturelle (la circulation de l'air de refroidissement est amorcée par un thermosiphon) ;
- la fermeture des puits verticaux à leurs extrémités, évitant le contact direct de l'air de refroidissement avec les colis (l'hygrométrie de l'air enfermé dans les puits est contrôlée ; cet air est également contrôlé vis-à-vis du risque de dissémination radioactive) ;
- la possibilité d'entreposer dans les puits en lieu et place des colis primaires, des casiers de 3 colis de stockage, en soutien à la réversibilité du stockage ;
- une zone au-dessus des puits accessible aux opérateurs (en permanence avec l'adoption d'une hotte blindée comme dans E-EV-SE, ou en-dehors des phases de manutention sinon).

6.3.1 Architecture et génie civil

Dans cette option, chaque module d'entreposage est constitué de fosses juxtaposées, équipées de puits verticaux. Une zone commune à l'ensemble des fosses d'un ou de plusieurs modules est dédiée au chargement des colis dans les casiers (Figure 6.3-1).

[159] Une installation d'entreposage comprend en général des zones accessibles aux opérateurs en l'absence de manutention de colis (interfaces pour la réception et l'expédition des colis, hall de manutention), alors que la zone où s'effectue la conservation des colis entreposés est en général en permanence inaccessible.

[160] Les capteurs de déformations doivent être systématiquement associés à des capteurs de température.

Un module a été étudié spécifiquement pour accueillir l'ensemble des colis des familles F1-3-02 et F1-4-01, en plus de colis de la famille F1-3-01, et potentiellement soutenir la réversibilité du stockage. D'autres modules ont été étudiés pour n'accueillir que des colis de la famille F1-3-01 (typiquement de l'ordre de 1 000 à 1 500 m^3 dans les hypothèses de l'étude).

Pour faciliter la surveillance et, si nécessaire, la maintenance des structures d'entreposage dans une optique de durabilité séculaire, il est envisageable d'intégrer à un module une fosse de réserve qui permettrait d'y accueillir des colis provenant d'une autre fosse. Cette fosse pourrait être mutualisée avec l'ensemble des modules de l'installation d'entreposage.

Casiers

Les caractéristiques des casiers de regroupement des colis sont définies au Tableau 6.3-1. Il s'agit de structures métalliques constituées d'une virole, d'un fond, d'un axe central et de nervures pour la séparation entre logements (Figure 6.3-2 et Figure 6.3-3). Comme indiqué plus haut, ils peuvent être fabriqués en acier non ou faiblement allié, recyclé.

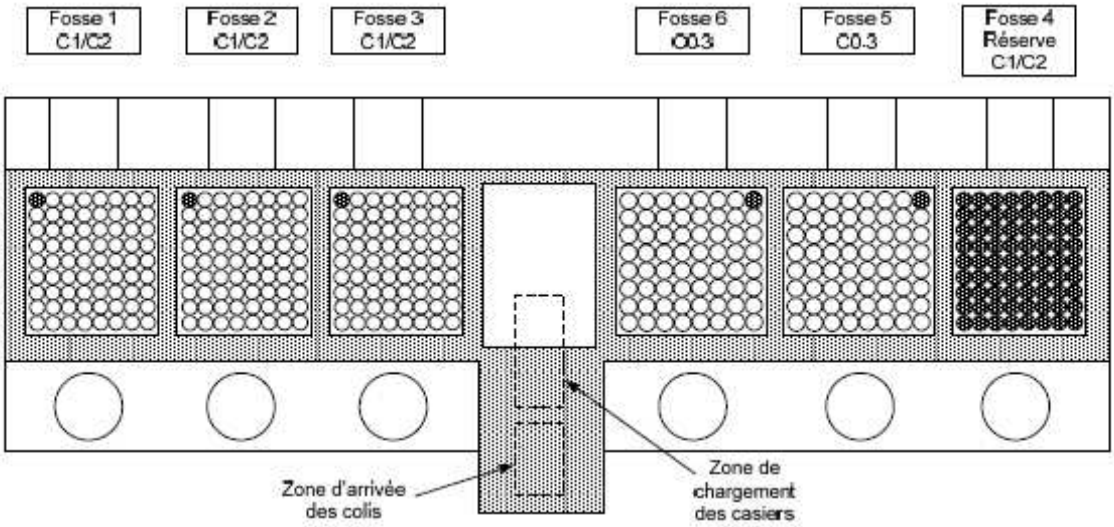


Figure 6.3-1 Schéma du module polyvalent (vue de dessus)

Tableau 6.3-1 Caractéristiques des casiers pour colis primaires et colis de stockage

	Familles F1-3-01 et F1-3-02 (colis types C0. Et C0.2)		**Famille F1-4-01** (colis type C0.3)	
	Primaires	**Stockage**	**Primaires**	**Stockage**
Diamètre	1430 mm		1 640 mm	
Hauteur	1 430 mm	1 700 mm	1 380 mm	
Capacité	6 colis	3 colis	6 colis	3 colis
Masse du casier vide	1 500 kg	1 700 kg	1 800 kg	
Masse du casier chargé	4 500 kg	7 595 kg	4 260 kg	6 735 kg

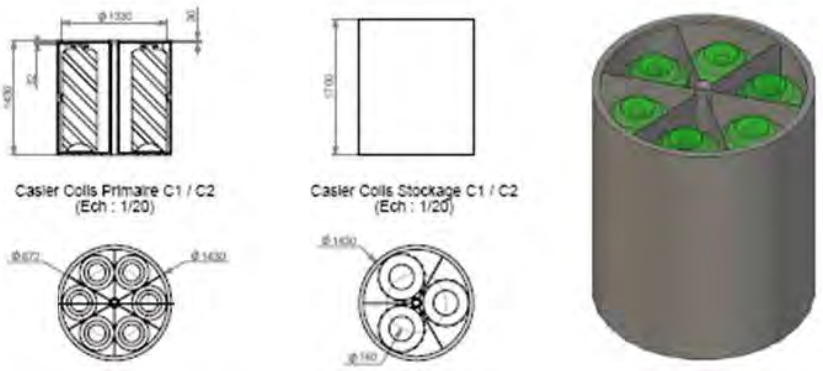


Figure 6.3-2 Schémas des casiers pour colis primaires et colis de stockage des familles F1-3-01 et F1-3-02

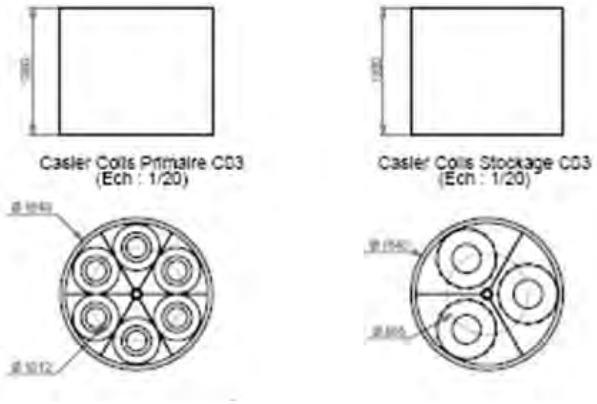


Figure 6.3-3 Schémas des casiers pour colis primaires et colis de stockage de la famille F1-4-01

Fosses

Chaque fosse d'entreposage est délimitée par des voiles épais en béton. Elle est couverte d'une dalle la séparant du hall de manutention. Les voiles, la dalle ainsi que des bouchons amovibles au droit de chaque puits assurent la protection radiologique du public et des opérateurs (Tableau 6.3-2). Ils réalisent aussi la protection des fosses vis-à-vis du risque de chute d'avion. Il est à noter que le paramètre le plus dimensionnant pour les épaisseurs de béton est la radioprotection.

Le nombre de puits par fosse s'adapte aux diamètres des puits. Ces derniers peuvent être disposés selon un pas carré pour optimiser la compacité. Les caractéristiques des fosses étudiées sont détaillées au Tableau 6.3-3.

Il peut être envisagé de laisser un puits vide dans chaque fosse pour faciliter le retrait de l'un quelconque des colis entreposés, dans l'optique de la surveillance.

Tableau 6.3-2 Epaisseurs de protection radiologique du génie civil

	Epaisseurs de béton	Débits d'équivalent de dose
Voiles extérieurs	160 cm	0,5 µSv.h^{-1}
Voiles intérieurs protégeant des postes de travail permanents	145 cm	3 µSv.h^{-1}

Puits verticaux aménagés dans les fosses

Les puits d'entreposage sont constitués de tubes en acier inoxydable résistant à la corrosion atmosphérique, d'épaisseur 5 mm, d'une hauteur pouvant atteindre 13,7 m et de diamètre intérieur adapté au diamètre des casiers destinés à y être déposés (1 680 mm et 1 470 mm suivant les familles).

Le refroidissement par convection naturelle limite la puissance totale à l'intérieur d'un puits, afin que les exigences de température au cœur du verre et en surface du béton soient respectées (chapitre 5). Ainsi, pour une puissance thermique des colis primaires de la famille F1-3-01 de 1 000 W, il est possible d'empiler jusqu'à sept casiers. La faible puissance thermique ainsi que la hauteur moins importante des colis de la famille F1-4-01 permettent d'envisager un empilement de neuf casiers pour cette famille.

Les puits sont fermés à leurs extrémités et équipés d'une double enveloppe, ménageant un espace annulaire de 55 mm pour la circulation de l'air de refroidissement. Ils peuvent être posés et fixés sur le sol en fond de fosse. Un fourreau noyé dans la dalle assure le maintien des bouchons de puits. Il est relié aux puits par un soufflet qui permet de rectifier l'erreur d'alignement ainsi que les jeux verticaux (jeux de fabrication, dilatation, déformation de la dalle, etc.). Une telle disposition, favorable à la durabilité, est retenue pour l'extension de E-EV-SE en construction[161].

Tableau 6.3-3 Dimensions des fosses d'entreposage

	Famille F1-3-01	**Famille F1-3-02**	**Famille F1-4-01**
Longueur	17,87 m		
Largeur	16,02 m		17,7 m
Hauteur sous dalle	15,6 m		
Entraxe puits	1,85 m		2,06 m
Nombre de puits	9 x 8 = **72**		8 x 8 = **64**
Nombre de colis primaires entreposables	(72 – 1) x 7 x 6 = **2 982**	(72 – 1) x 9 x 6 = **3 834**	(64 – 1) x 9 x 6 = **3 402**
Nombre de colis de stockage entreposables	(72 – 1) x 7 x 3 = **1 491**	(72 – 1) x 9 x 3 = **1 917**	(64 – 1) x 9 x 3 = **1 701**

[161] En étant positionné en partie haute de la fosse, le soufflet de dilatation se trouve dans une zone d'atmosphère sèche, la plus favorable vis-à-vis des risques de corrosion.

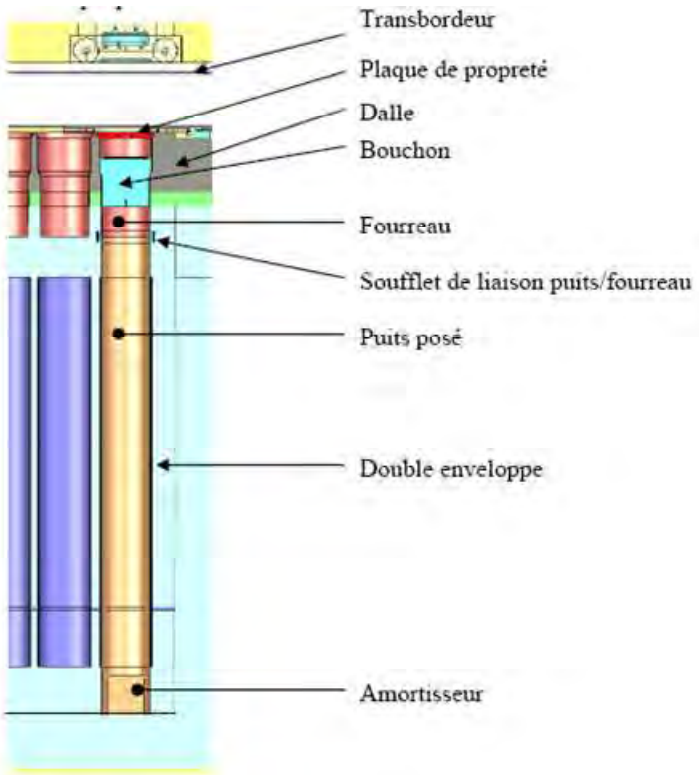


Figure 6.3-4 Schéma de configuration d'un puits d'entreposage

6.3.2 Manutention des colis

Dans l'option de conception étudiée, la manutention des colis comporte deux étapes (Figure 6.3-5) :

- la mise en place des colis dans les casiers, ou leur extraction des casiers dans le cadre du désentreposage ;
- la mise en place des casiers dans les puits, ou leur retrait.

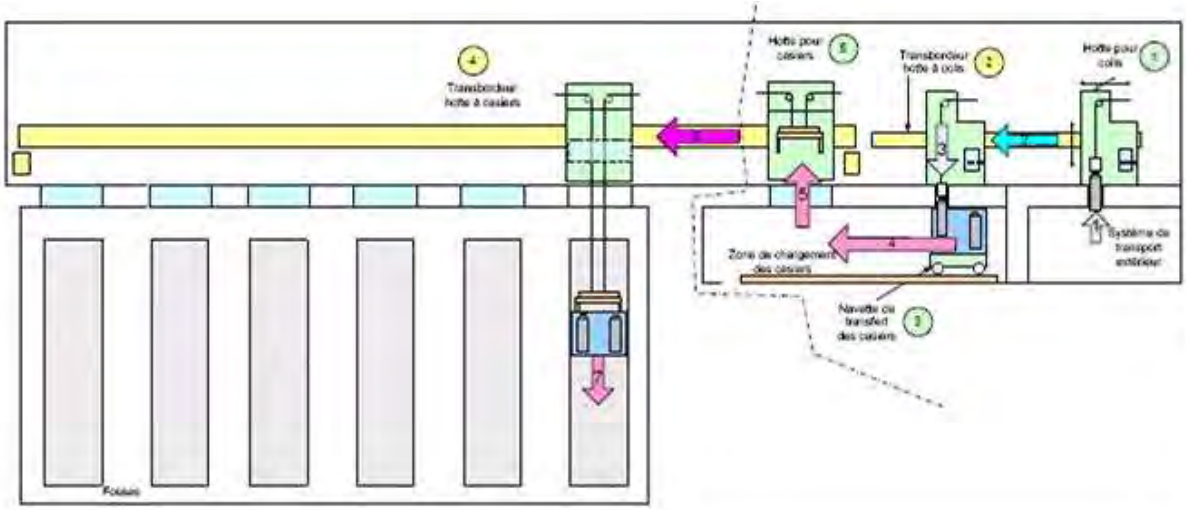


Figure 6.3-5 Synoptique de manutention dans l'architecture d'entreposage en puits verticaux avec regroupement des colis en casiers

La mise en place (ou l'extraction) des colis dans les casiers peut s'effectuer au moyen d'une hotte blindée classique, telle qu'utilisée notamment dans les entrepôts actuels du site de La Hague. Cette hotte équipée d'une pince de préhension de colis primaire ou de stockage (Figure 6.3-6) prend en charge les colis un à un. Un pont transbordeur permet de transférer cette hotte de manutention depuis la zone d'arrivée des colis jusqu'à la zone de chargement des casiers. Dans cette zone, le casier à remplir est posé sur une navette à barillet, qui présente les logements des colis, tour à tour, en face de l'ouverture de la dalle. Les colis sont alors déposés un à un dans le casier, toujours à travers une dalle de radioprotection.

Une fois le casier rempli, il peut être transféré à l'aide d'une navette circulant dans un couloir irradiant jusqu'à sa fosse d'entreposage.

La dépose du casier dans un puits pose la question d'une manutention sous hotte blindée (comme pratiqué dans E-EV-SE) ou en cellule irradiante (selon le principe retenu dans Cascad).

L'adoption d'une hotte blindée a été privilégiée dans l'étude de faisabilité[162]. Equipée d'une pince de préhension, elle permet la récupération du casier à travers une dalle de radioprotection. Elle est ensuite positionnée au-dessus du puits d'entreposage par un pont transbordeur.

Les dimensions des casiers rendent cette hotte beaucoup plus massive que la précédente. Elle est de forme parallélépipédique (Figure 6.3-7). L'une de ses extrémités est conçue pour recevoir le casier sur le chariot, tandis que l'autre permet de recevoir le bouchon de protection radiologique du puits d'entreposage. La plaque de propreté, présente au-dessus de chaque bouchon de protection radiologique est déplacée et remise par un dispositif associée à la hotte (non représenté sur la figure), mais à l'extérieur de celle-ci.

La hotte est équipée d'une jupe télescopique (6 tonnes), qui s'abaisse et vient se positionner au-dessus du puits en assurant la continuité de la protection radiologique.

La masse de la hotte de transfert des casiers a été estimée à 250 tonnes en pleine charge pour un débit de dose de 15 $\mu Sv.h^{-1}$ à 30 cm (Tableau 6.3-4) ou à 220 tonnes pour un débit de dose de 100 $\mu Sv.h^{-1}$ à 30 cm tel que considéré dans E-EV-SE. La prise en compte de colis ayant une puissance thermique en entrée de 800 W au lieu de 1 000 W diminuerait la masse de la hotte de 15 tonnes.

Cette masse importante constitue une difficulté de dimensionnement du pont transbordeur. L'alternative d'une manutention en zone active l'éviterait. Les parois du hall de manutention assureraient alors la radioprotection et l'accès au personnel en serait interdit en cours de manutention.

Pour retirer un colis quelconque dans le cadre de la surveillance de l'entreposage, il est nécessaire de manutentionner au plus six ou huit casiers (selon la famille de colis), puis d'extraire le colis recherché de son casier. La durée d'une telle opération est estimée à environ 13 heures.

[162] La maintenance des ponts transbordeurs et des hottes de transfert peut s'effectuer directement par les opérateurs au contact. Les équipements sujets à des interventions ou des opérations de maintenance (capteurs, actionneurs, limiteur de couple, etc.) peuvent être implantés à l'extérieur des protections radiologiques pour être directement accessibles sans mesure particulière. Dans le cas d'une intervention sur les équipements implantés à l'intérieur des hottes (chariots, barillet, pince, etc.), il est nécessaire préalablement à l'intervention des opérateurs d'évacuer le colis, au moyen éventuel d'ultimes secours à commande manuelle.

Tableau 6.3-4 Epaisseurs de protection radiologique des hottes, calculées pour un débit de dose de 15 µSv.h⁻¹ à 30 cm

Hotte de manutention individuelle des colis	Hotte de manutention des casiers
1 cm d'acier inox 20 cm de plomb 27 cm de béton à la colémanite[163] 6 cm d'acier non allié	2 cm d'acier inox 18 cm de plomb 28 cm de composé neutrophage[163] 0,3 cm de cuivre 0,9 cm de PN7 (béton) 5 cm d'acier non allié

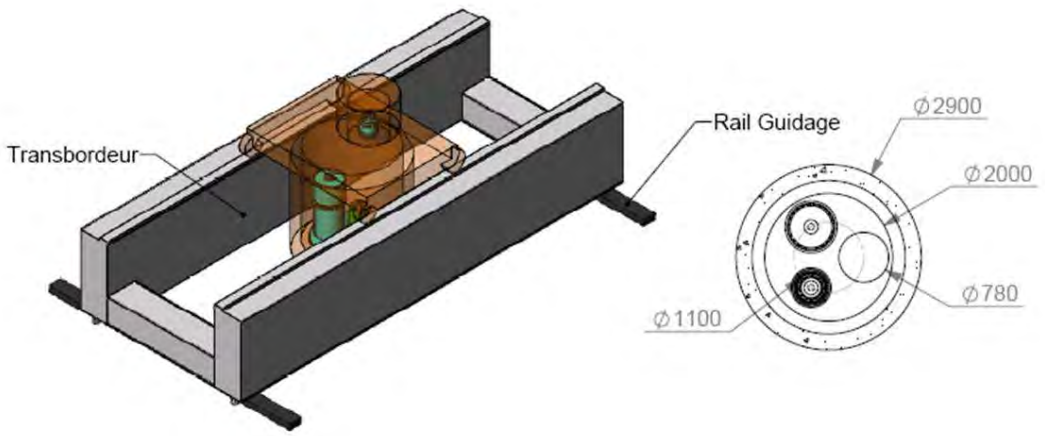


Figure 6.3-6 Schéma de la hotte blindée de manutention individuelle des colis

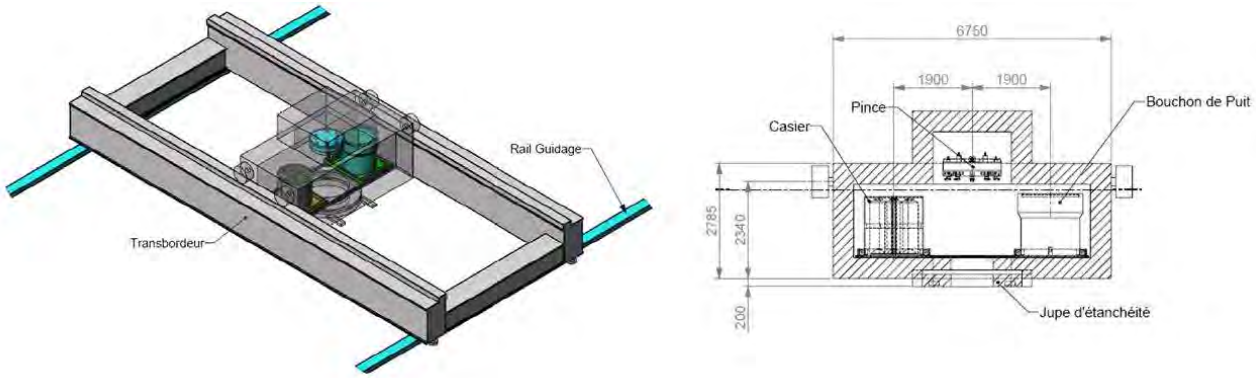


Figure 6.3-7 Schéma de la hotte blindée de manutention des casiers

[163] Un matériau neutrophage est ajouté pour l'atténuation des neutrons émis par les déchets. L'épaisseur d'acier non allié placée à l'extérieur atténue le rayonnement gamma secondaire émis par le matériau neutrophage.

6.3.3 Refroidissement des fosses

Suivant le même principe que E-EV-SE, chaque fosse d'entreposage peut être ventilée par convection naturelle (Figure 6.3-8). Une cheminée propre à chaque fosse, de hauteur 35 m, assure le tirage naturel nécessaire au refroidissement de la fosse et des colis qu'elle contient. L'air frais est prélevé à l'extérieur au niveau des entrées d'air puis descend dans le plénum inférieur de la fosse par un carneau de la longueur de la fosse. Un platelage intermédiaire permet de canaliser l'air de refroidissement en supprimant les courts circuits entre puits. L'air frais pénètre ainsi en partie basse, circule dans la double enveloppe des puits et ressort plus chaud dans le plénum supérieur pour s'extraire ensuite par la cheminée.

Une filtration primaire peut être installée à l'introduction d'air pour arrêter la majeure partie des poussières et polluants atmosphériques en suspension.

Cependant le choix d'une convection naturelle impose de minimiser les résistances aérauliques de manière à ne pas compromettre l'amorçage du thermosiphon. En particulier, cela ne permettrait pas la mise en place de systèmes de filtration à très haute efficacité (THE) de l'air de refroidissement, ni une régulation thermique et hydrique de l'air avant son admission dans la fosse. L'adoption d'une double enveloppe évite un contact entre l'air de refroidissement et les colis de déchets, et permet ainsi de constituer un système de confinement complémentaire et de contrôler l'humidité relative au contact des conteneurs et des casiers (voir infra).

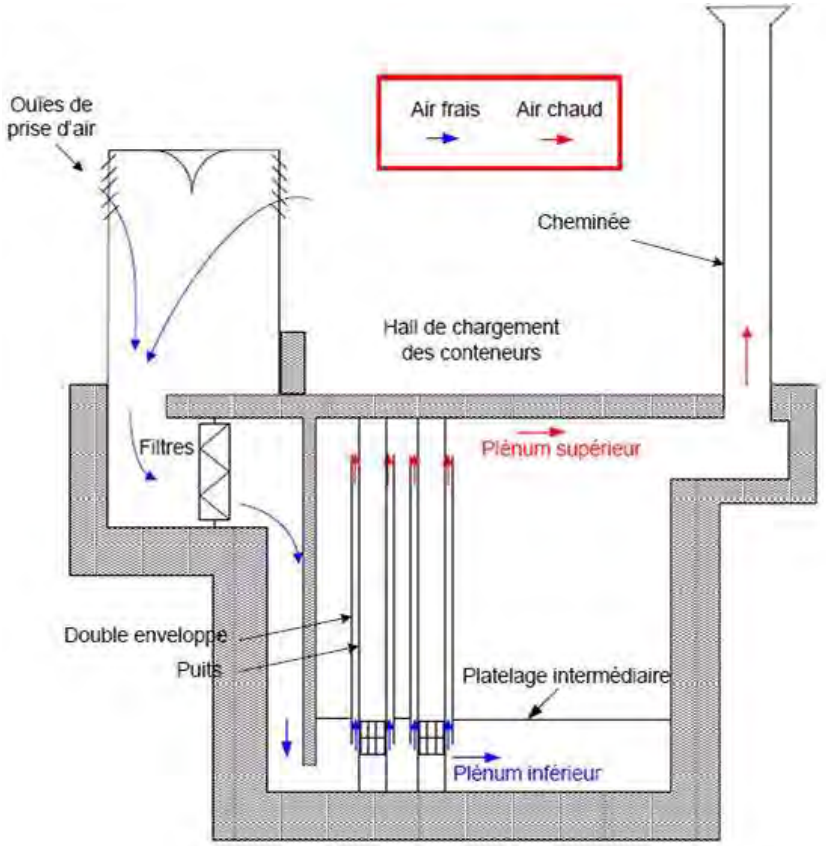


Figure 6.3-8 Schéma de principe de fonctionnement du procédé de refroidissement

Des simulations ont permis de vérifier que la convection naturelle permettrait de refroidir les colis dans le respect des exigences de température exprimées au chapitre 5, pour des puissances thermiques unitaires initiales allant jusqu'à 1 000 W. L'efficacité de refroidissement est telle que l'ordonnancement dans le temps du remplissage d'une fosse peut s'affranchir de toute procédure particulière.

Des écrans calorifuges peuvent être mis en place pour limiter l'échauffement du béton[164] :

- pour la dalle supérieure dont le béton n'assure que la protection radiologique, le calorifuge (épaisseur 400 mm) serait placé au contact même de la dalle ;
- pour les parois latérales de la fosse, un écran calorifuge d'épaisseur 100 mm serait maintenu à 200 mm de ces parois (Figure 6.3-9) et sous le pied de la cheminée ;
- pour protéger la cheminée, un écran calorifuge serait placé à même la paroi intérieure.

Une circulation d'air par tirage naturel alimenterait en air frais l'espace compris entre les parois latérales des fosses et le calorifuge. Des diaphragmes peuvent être installés à l'entrée de cet espace, au niveau du platelage intermédiaire, pour permettre une répartition uniforme de l'air.

Le Tableau 6.3-5 indique les débits d'air de refroidissement calculés et les températures au cœur du verre et en surface des casiers et du béton. Les calculs ont été réalisés pour deux températures extérieures : 19 °C et 37,5 °C qui correspondent à des moyennes[165] en conditions normales et extrêmes.

Il est à noter que l'adoption d'une convection naturelle pour le refroidissement n'est pas favorable à une récupération éventuelle de la chaleur dégagée par les colis. Néanmoins, une petite partie de l'énergie semble pouvoir être récupérée au niveau de la cheminée, sans toutefois nuire à l'efficacité du procédé.

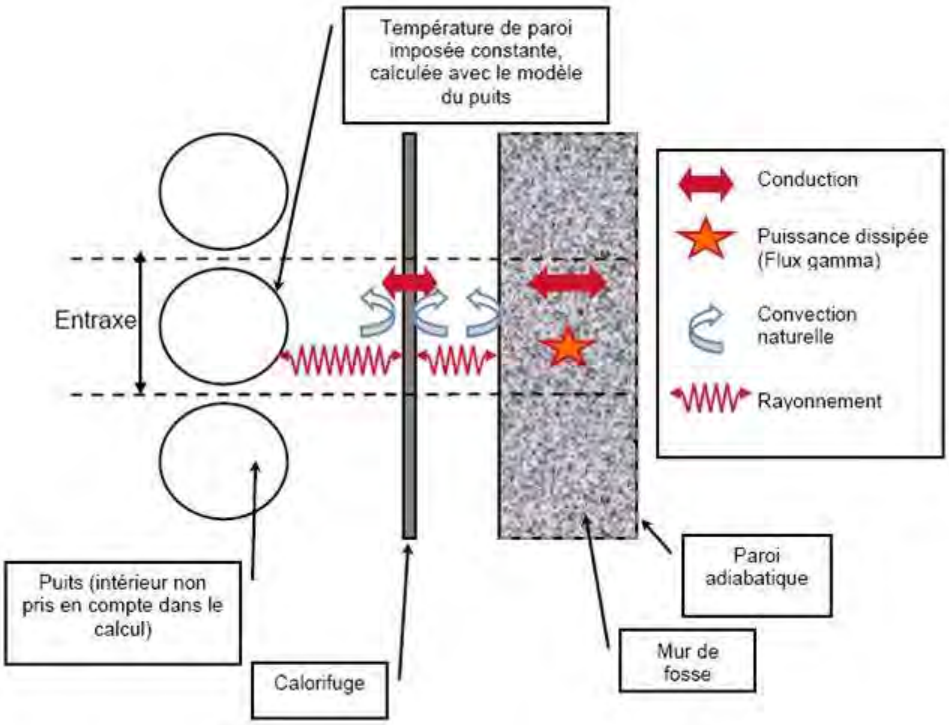


Figure 6.3-9 Schéma de principe de l'écran calorifuge (vue de dessus)

[164] Outre les échanges par rayonnement direct, conduction et convection, l'étude prend en compte l'échauffement par absorption du rayonnement gamma dans le béton des parois latérales des fosses.

[165] L'inertie thermique des colis est telle que les variations journalières de température de l'air extérieur ne peuvent impacter de manière significative la température du verre. Il en est de même pour le béton en raison de l'inertie thermique des murs, du radier et de la dalle supérieure de radioprotection.

Tableau 6.3-5 Evaluation[166] des températures maximales en conditions normales et extrêmes

	Conditions normales		Conditions extrêmes	
	Température calculée	Critères	Température calculée	Critères
Air de refroidissement (air extérieur)	19 °C	-	37,5 °C	-
Cœur du verre	**418 °C**	**450 °C**	**432 °C**	**510 °C**
Casiers	272 °C	-	288 °C	-
Béton	**38 °C**	**70 °C**	**59 °C**	**80 °C**
Débit de refroidissement	46 $Nm^3.s^{-1}$	-	43 $Nm^3.s^{-1}$	-

6.4 Etude de faisabilité d'un bâtiment multi-étagé

Une autre étude de faisabilité a porté sur la transposition du principe de bâtiment multi-étagé de ECC à des colis de la famille F2-3-01 entrant avec une puissance maximale de l'ordre de 500 W. Comme dans le cas précédent, cette étude a aussi pris en compte les familles F1-3-02 et F1-4-01.

Les caractéristiques résumées de cette option technique sont :

- l'entreposage des colis sans regroupement ;
- la disposition verticale des colis sur des structures de dépose adaptées, sur quatre niveaux de bâtiment ;
- le refroidissement de l'ensemble des colis d'un même niveau par convection forcée (un circuit de recyclage permet un réchauffement de l'air de manière à placer les structures d'entreposage et les colis dans des conditions d'humidité favorisant leur durabilité) ;
- la possibilité d'accueillir les différentes familles de colis HA sans emplacements spécifiques ;
- la possibilité d'entreposer en lieu et place des colis primaires, des colis de stockage.

6.4.1 Architecture et génie civil

Dans cette option, tous les modules d'entreposage peuvent être de conception identique, quelles que soient les familles qu'ils accueillent. Tous peuvent dans le principe accueillir des colis de stockage au lieu de colis primaires. En pratique, un colis de stockage occuperait la place d'un colis primaire (pour les familles F1-3-02 et F1-4-01) ou de deux colis primaires (famille F2-3-01). Cette option est ainsi particulièrement favorable à une reconfiguration telle que définie plus haut.

Un module d'entreposage comprend principalement :

- une zone d'entreposage qui peut être disposée sur quatre niveaux identiques, où sont déposés les colis en position verticale [repère A sur la Figure 6.4-1] ;
- une zone de ventilation de deux étages, accolée à la zone d'entreposage, abritant les équipements de ventilation (chaque niveau de la zone d'entreposage y dispose de son propre local de ventilation) [repère B] ;
- une zone d'interface pour l'accueil et le désentreposage des colis [repère C].

Un module de capacité de 1 050 à 1 225 m^3 occuperait au total une surface au sol de 144 m x 63 m pour une hauteur de 23 m environ.

Chaque niveau de la zone d'entreposage comporte quatre travées où les colis sont disposés verticalement en plusieurs rangs selon un pas carré (Figure 6.4-2). Une allée centrale divise chaque travée en deux alvéoles, dont les caractéristiques géométriques sont détaillées au Tableau 6.4-1.

[166] Les calculs correspondent aux conditions les plus pénalisantes : puissance unitaire de 1 000 W, casier situé en haut d'empilement et au centre d'une fosse remplie.

Pour éviter un échauffement excessif du béton au contact du colis, les colis reposent sur des structures constituées de planchers métalliques surélevés par rapport à chaque dalle du bâtiment. Ces planchers métalliques sont découplés thermiquement (en conduction) de la dalle.

La surface de pose des colis peut ainsi être constituée de plaques métalliques juxtaposées avec un écartement suffisant pour permettre leur dilatation différentielle. Ces plaques sont liaisonnées aux profilés support par des fixations permettant l'isolation thermique (Figure 6.4-3).

L'ensemble de ce dispositif pourra être constitué d'acier recyclé, de façon analogue aux casiers de regroupement de colis de l'architecture en puits verticaux.

Les voiles latéraux et la dalle de toit, constitués de béton en très forte épaisseur, assurent la protection radiologique du public et des opérateurs ainsi que la protection de l'entreposage vis-à-vis du risque de chute d'avion (Tableau 6.4-2). Les zones irradiantes sont fermées par des portes blindées pour la continuité de la protection radiologique (ces portes sont figurées en bleu à la Figure 6.4-4.)

Tableau 6.4-1 Caractéristiques géométriques des alvéoles pour chaque type de colis

		Famille F1-3-01	Famille F1-3-01	Famille F1-4-01
Longueur		16,6 m		
Largeur		9,45 m		
Hauteur (sous plafond)		4,5 m		
Nombre de colis entreposables par alvéole	primaires	25 x 10 = **250**	20 x 8 = **160**	19 x 8 = **152**
	stockage	20 x 8 = **160**		
Nombre de colis entreposables par niveau	primaires	250 x 8 = **2 000**	160 x 8 = **1 280**	152 x 8 = **1 216**
	stockage	160 x 8 = **1 280**		
Entraxe des colis	primaires	0,65 m	0,81 m	0,85 m
	stockage	0,81 m		

Tableau 6.4-2 Epaisseurs de protection radiologique du génie civil

	Epaisseurs de béton	Débits d'équivalent de dose
Voiles extérieurs	155 cm	0,5 $\mu Sv.h^{-1}$
Voiles entre la zone d'entreposage et les postes de travail permanents	140 cm	3 $\mu Sv.h^{-1}$

Tableau 6.4-3 Epaisseurs de protection radiologique des portes blindées

Matériau	Epaisseur
Plomb	37 cm
Neutrophage RP 21 (matériau constitué de polyéthylène, de résine polyester, d'alumine et d'un matériau boré)	10 cm
Acier	2 cm

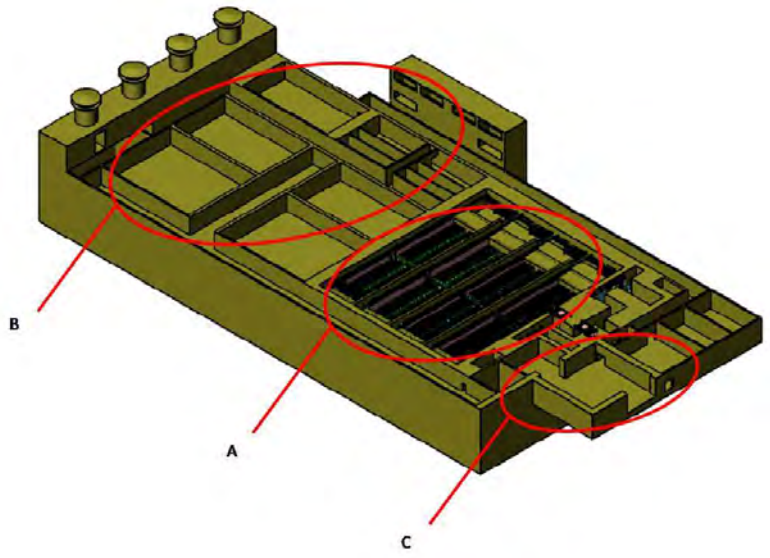


Figure 6.4-1 Vue d'un module d'entreposage en bâtiment multi-étagé

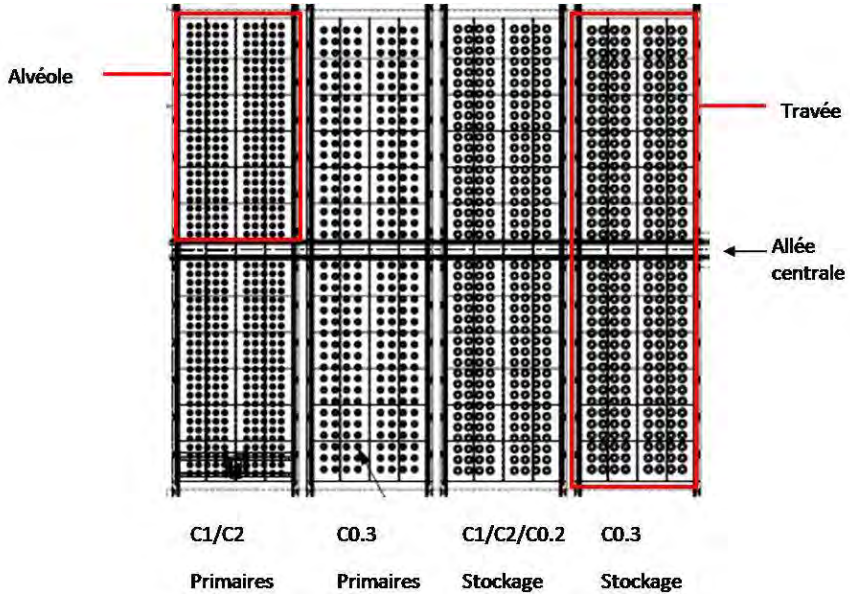


Figure 6.4-2 Schéma d'un niveau (ou étage) d'entreposage (vue de dessus)

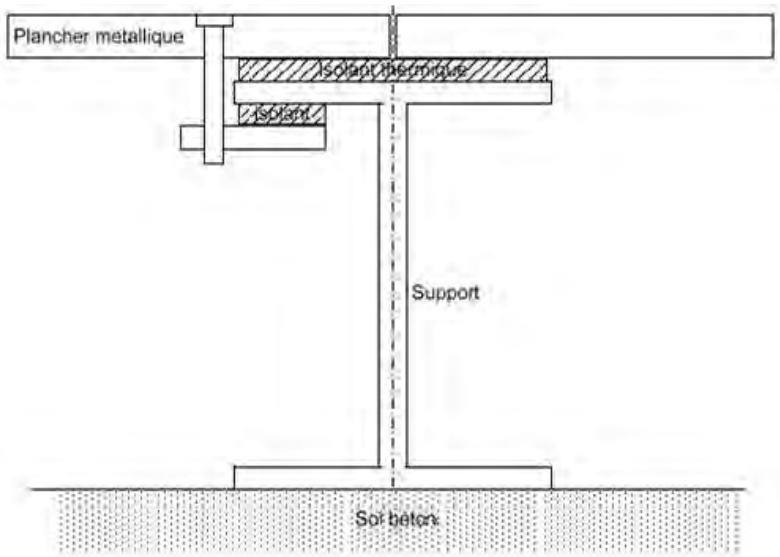


Figure 6.4-3 Détail de la structure de dépose des colis (coupe transversale)

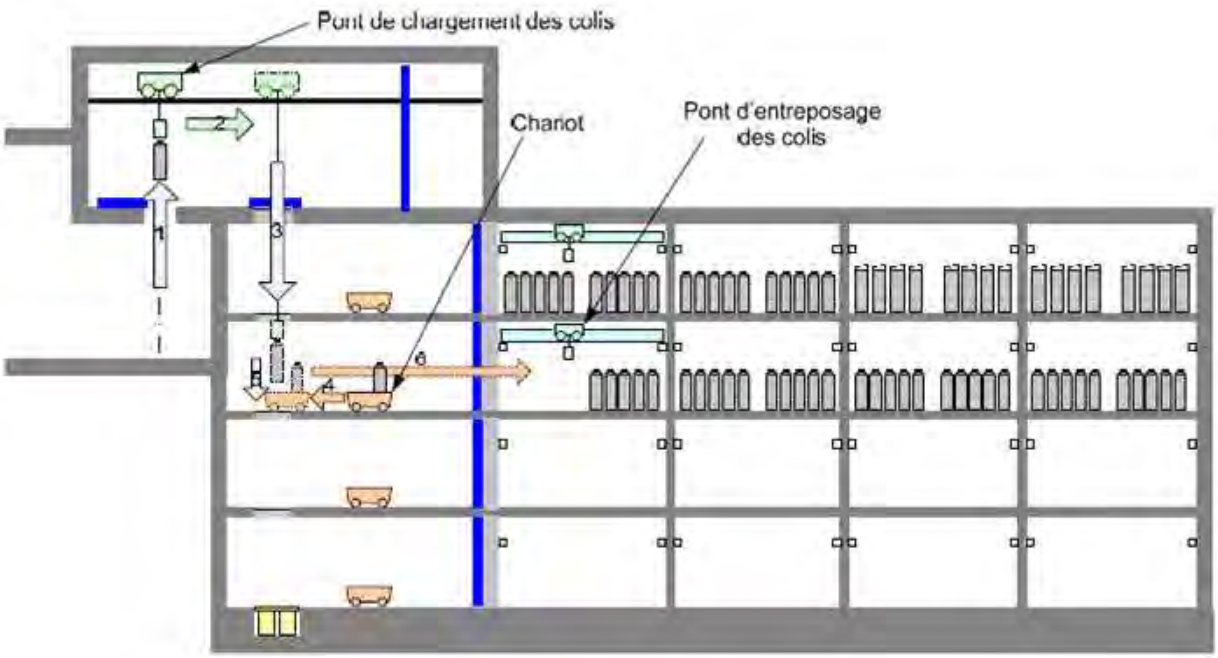


Figure 6.4-4 Synoptique de manutention en bâtiment multi-étagé

6.4.2 Manutention des colis

L'adaptation du principe de bâtiment multi-étagé de ECC aux colis primaires et de stockage HA a conduit à substituer un pont de manutention individuelle aux chariots automoteurs qui, dans ECC, déposent simultanément quatre colis CSD-C (cf. chapitre 3).

Dans cette option, les colis entrant sont transférés par un « pont de chargement » vers le niveau d'entreposage qui leur est affecté, et déposés sur le « chariot de transfert » de ce niveau (Figure 6.4-4 ci-dessus). Deux colis sont ainsi déposés sur le même chariot, qui les amène au droit d'un alvéole d'entreposage. Un « pont d'entreposage » manutentionne alors chaque colis depuis le chariot de transfert jusqu'à son emplacement d'entreposage. Le désentreposage s'effectue par inversion des opérations.

Les équipements de manutention évoluent en zone irradiante et en température élevée (jusqu'à 50 °C, voir infra). Ils disposent de doubles motorisations pour pallier les cas de panne, et de systèmes d'ultime secours commandés à distance permettant en toutes situations de déposer sans risque les colis manutentionnés et de ramener les équipements dans une zone accessible pour maintenance.

Ainsi le pont de chargement des colis, de capacité de levage de 40 kN, comporte une double motorisation sur le chariot de translation comme sur l'ensemble de levage[167] (Figure 6.4-5). La pince de préhension comporte également une double motorisation, ainsi qu'un système de verrouillage mécanique interdisant l'ouverture lors du transfert d'un colis. Cette pince est adaptée aux dimensions et à la masse des colis à manutentionner, impliquant un remplacement pour un changement de type de colis. Les opérations de translation et d'ouverture de pince font l'objet de dispositifs d'ultime secours.

Le chariot de transfert des colis circule sur rails dans l'allée centrale de chaque niveau[168]. Il est aussi équipé d'une double motorisation[169]. En cas hypothétique de panne de cette double motorisation, la récupération du chariot s'effectue à l'aide d'un « lièvre », dispositif d'ultime secours passif situé en amont du chariot et raccordé par des câbles en acier à une zone de maintenance (Figure 6.4-6).

Le pont d'entreposage est de mêmes capacité et conception que le pont de chargement des colis. La poutre principale du pont se déplace en translation dans toute la longueur d'une travée. Le chariot pont se déplace sur la poutre dans la largeur (mouvement de « direction »).

Un ringard d'ultime secours en direction permet d'actionner le chariot pont sur la poutre. Les colis sont déplacés avec une hauteur de survol de quelques centimètres au-dessus des structures de dépose.

Chaque niveau ne comporte qu'un seul pont d'entreposage, transféré d'un alvéole à l'autre au moyen d'un chariot de transfert se déplaçant dans un couloir de manutention. Une zone garage pont est ménagée en extrémité de ce couloir de manutention, afin de pouvoir procéder à une maintenance au contact.

Il serait possible de limiter les équipements d'un module à un seul chariot de transfert de colis, un seul pont d'entreposage et un seul chariot de transfert de ce pont. Cela faciliterait notamment le démantèlement de l'installation au terme de son exploitation, en limitant le volume de déchets induits. Dans ce cas, les équipements devraient être transférés d'un niveau à l'autre et reconfigurés à chaque niveau.

L'option étudiée se prête bien à la récupération d'un colis particulier, dans le cadre de la surveillance. Il faut en effet déplacer au maximum quatre colis (colorés en orange à la Figure 6.4-8) pour accéder au colis ciblé (en bleu). Ces colis sont alors déposés temporairement dans l'allée centrale de l'alvéole située en face dans la même travée. La durée de récupération d'un colis quelconque est de moins de deux heures.

[167] L'ensemble de levage comporte deux câbles enroulés sur deux tambours et un frein de sécurité sur chaque tambour.

[168] La position du chariot est donnée en continu par un codeur embarqué et entraîné par un galet moteur. Un capteur embarqué permet de positionner précisément le chariot face à la rangée d'entreposage.

[169] Cette motorisation est montée sur la structure du chariot et entraîne en rotation les galets par l'intermédiaire de transmission à cardans et de chaînes à rouleaux.

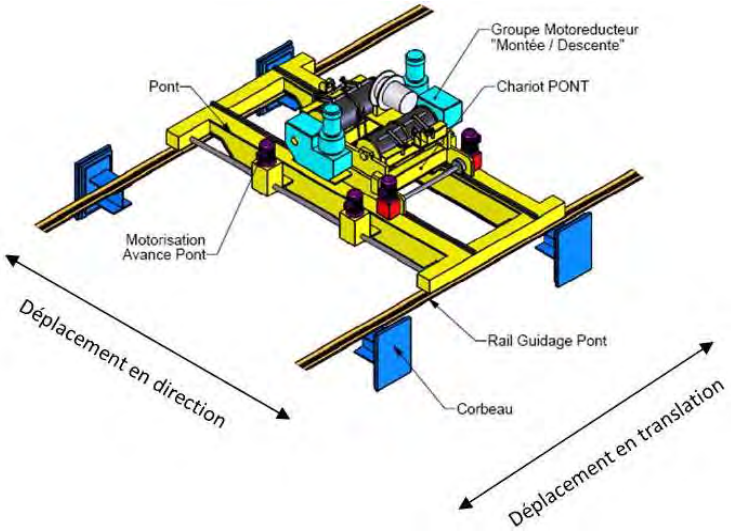


Figure 6.4-5 Schéma du pont de chargement des colis

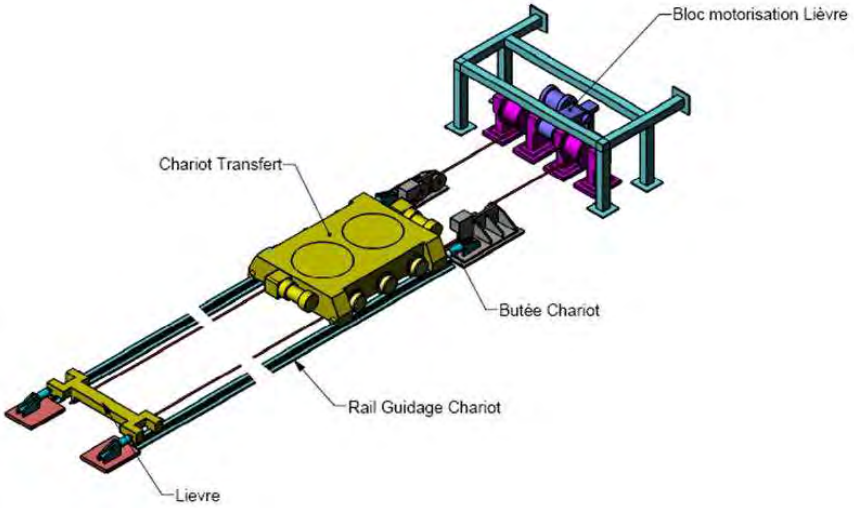


Figure 6.4-6 Schéma du chariot de transfert des colis

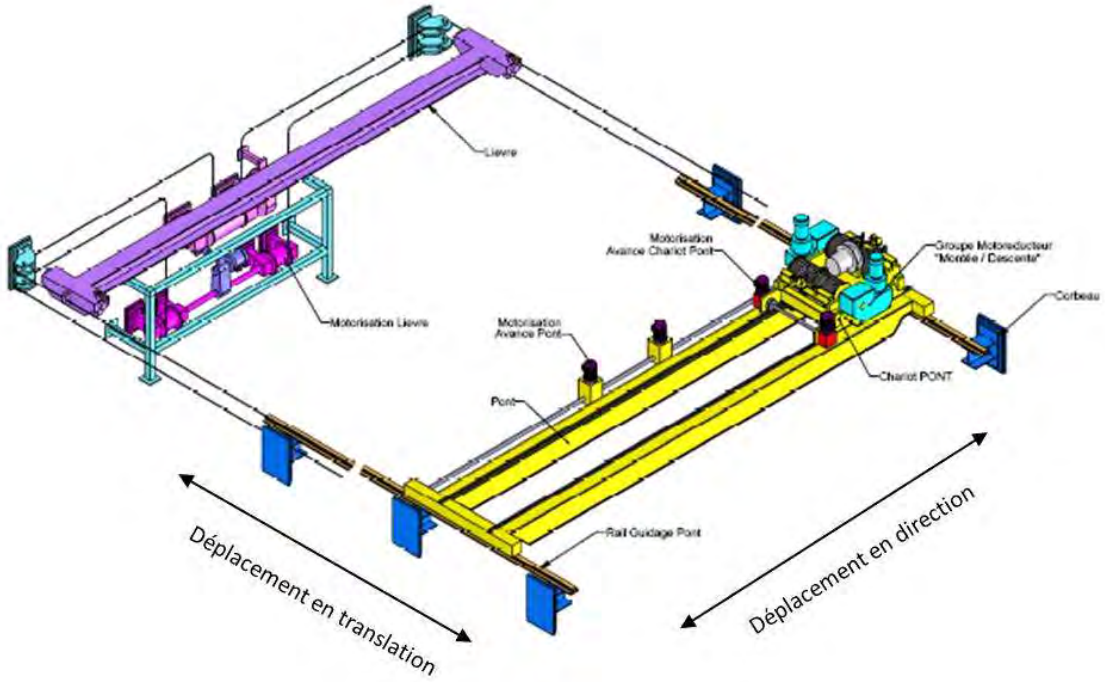


Figure 6.4-7 Schéma du pont d'entreposage des colis

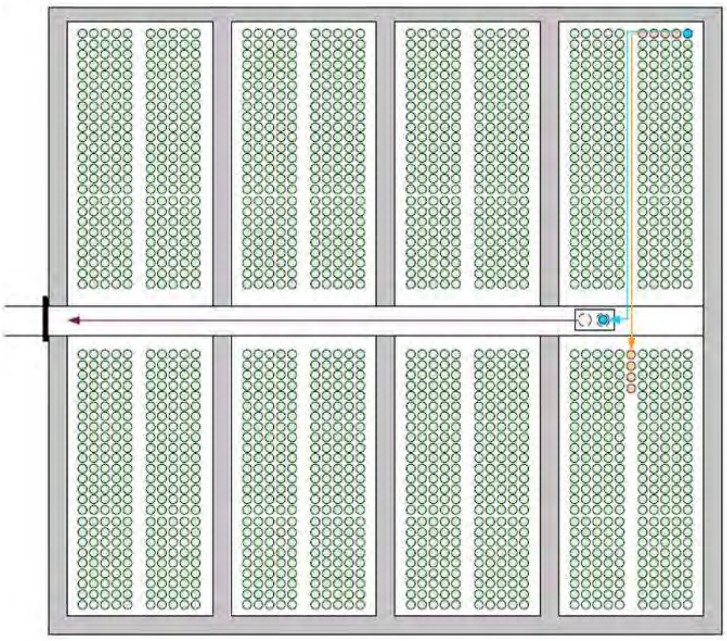


Figure 6.4-8 Schéma de principe de récupération d'un colis

6.4.3 Refroidissement des colis

Les colis entreposés sont refroidis au moyen d'une ventilation par convection forcée. Elle fonctionne avec de l'air frais prélevé à l'extérieur ou avec un mélange d'air frais et d'air recyclé (Figure 6.4-9). L'objectif est d'obtenir une température de l'air et une hygrométrie relative respectivement inférieures à 50 °C et 60 %. Le premier critère est lié à la protection des équipements électroniques présents en zone d'entreposage (capteurs, électronique embarquée sur chariot) tandis que le second protège les colis de la corrosion (ainsi que les structures métalliques supportant les colis). Le taux de recyclage permet de réguler la température et l'hygrométrie de l'air introduit pour le refroidissement.

Un confinement dynamique de la zone d'entreposage peut compléter le confinement statique réalisé par les colis, en plaçant les niveaux d'entreposage en dépression par rapport aux locaux adjacents et en disposant une filtration THE sur l'extraction du circuit de ventilation (voir l'encadré). Dans la configuration étudiée, les colis entreposés peuvent être surveillés par un contrôle de non contamination de l'air extrait de chaque niveau (c'est alors l'ensemble des colis entreposés sur un niveau qui est surveillé globalement).

La mise en place d'un calorifuge permet de protéger le béton des voiles et des dalles du rayonnement thermique des colis. Il peut être constitué d'une couche de 100 mm d'épaisseur sous chaque dalle et à 200 mm des parois latérales.

Le Tableau 6.4-4 indique les températures des colis, des bétons et du calorifuge calculées dans un cas pénalisant : niveau rempli de 2 000 colis de puissance unitaire 500 W, température extérieure de 35 °C, humidité relative de l'air à l'extérieur de 100 %. Dans ce cas, l'air en entrée est réchauffé jusqu'à 44,5 °C de manière à abaisser l'humidité relative à 60 %. Le débit de ventilation nécessaire est d'environ 600 000 $m^3.h^{-1}$. Ce débit élevé[170] s'explique par un écart de température de l'air particulièrement faible entre l'entrée et la sortie (5,5 °C). Une récupération de l'énergie dissipée par les colis serait néanmoins envisageable en équipant l'extraction du circuit de ventilation d'un échangeur de chaleur.

D'un point de vue thermique, l'option de conception en bâtiment multi-étagé apporte beaucoup moins de souplesse que l'architecture en puits verticaux. Elle n'est raisonnablement envisageable que pour des colis dont la puissance n'est pas trop élevée (typiquement 500 Watts) à cause des débits de ventilation nécessaires.

Dans la configuration étudiée, les débits de ventilation ne peuvent pas être régulés en fonction des conditions climatiques extérieures fluctuantes, ni du taux remplissage[171]. Des batteries électriques d'appoint de réchauffage doivent même être ajoutées pour atteindre les conditions hygrométriques recherchées lorsqu'un niveau d'entreposage n'est pas suffisamment rempli.

[170] Il est à noter qu'un tel débit impose des entrées d'air et des cheminées de très grandes sections pour limiter la vitesse de l'air.
[171] Les débits peuvent néanmoins être ajustés par paliers en fonction de la décroissance thermique des colis.

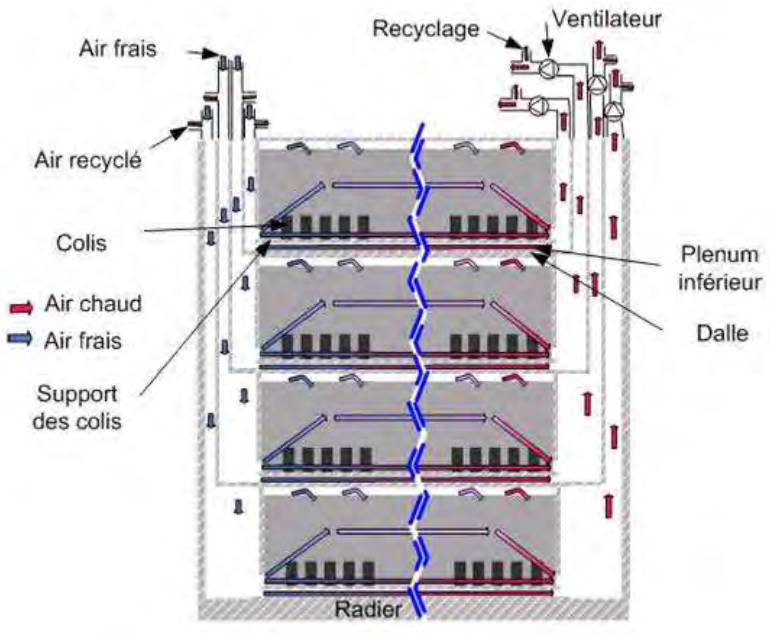


Figure 6.4-9 Schéma de circulation des fluides de refroidissement

Tableau 6.4-4 Evaluation des températures maximales

	Températures calculées	Critères
Air en entrée de niveau	44,5 °C	-
Air en sortie de niveau	**50 °C**	**50 °C**
Voiles en béton	**67 °C**	**70 °C**
Dalle en béton	**67 °C**	**70 °C**
Calorifuge	85 °C	-
Cœur du verre	**148 °C**	**450 °C**

Encadré 6.4-1 Procédé de refroidissement du bâtiment multi-étagé

Introduction de l'air

L'air frais est introduit par une prise d'air bardée située en terrasse du bâtiment. Il est ensuite filtré sur deux étages de moyenne et haute efficacités, puis distribué par des gaines en acier galvanisé raccordées au carneau en béton commun à l'ensemble des alvéoles d'un même niveau d'entreposage, et parallèle à l'allée centrale. L'introduction d'air dans chaque travée est assurée par des bouches antisismiques en acier inoxydable fixées sur le carneau en béton. Des tôles obturatrices d'équilibrage sont soudées après réglage de manière à répartir de façon homogène le débit du carneau entre les travées.

Circulation de l'air

Dans chaque travée, l'air de refroidissement emprunte deux circuits. Un circuit principal au-dessus du support des colis, en contact direct avec ceux-ci, assure l'évacuation de la chaleur des colis. Un circuit secondaire refroidit les murs et la dalle en béton située sous le support des colis : il utilise le plénum inférieur délimité par le support des colis et l'espace situé entre les murs et un calorifuge.

Extraction

L'extraction d'air de chaque fosse est effectuée mécaniquement par trois ventilateurs centrifuges (deux en mode normal et un en mode secouru). Chaque ventilateur est dimensionné pour 50 % du débit nominal. L'extraction dans chaque travée est assurée, symétriquement à l'introduction, par des bouches antisismiques fixées sur un carneau d'extraction. De même, des tôles obturatrices d'équilibrage sont soudées après réglage. A la sortie de chaque niveau, l'air passe dans une centrale de filtration THE et est ensuite rejeté à la cheminée ou recyclé en partie.

Recyclage

L'air recyclé, plus chaud et d'hygrométrie inférieure à 60 % permet, par mélange avec de l'air frais, d'obtenir un air en entrée relativement asséché. L'air recyclé est introduit dans le plénum de la prise d'air frais en amont de la filtration à l'aide d'un réseau en acier galvanisé calorifugé. L'introduction de l'air recyclé est assurée par le refoulement des ventilateurs d'extraction.

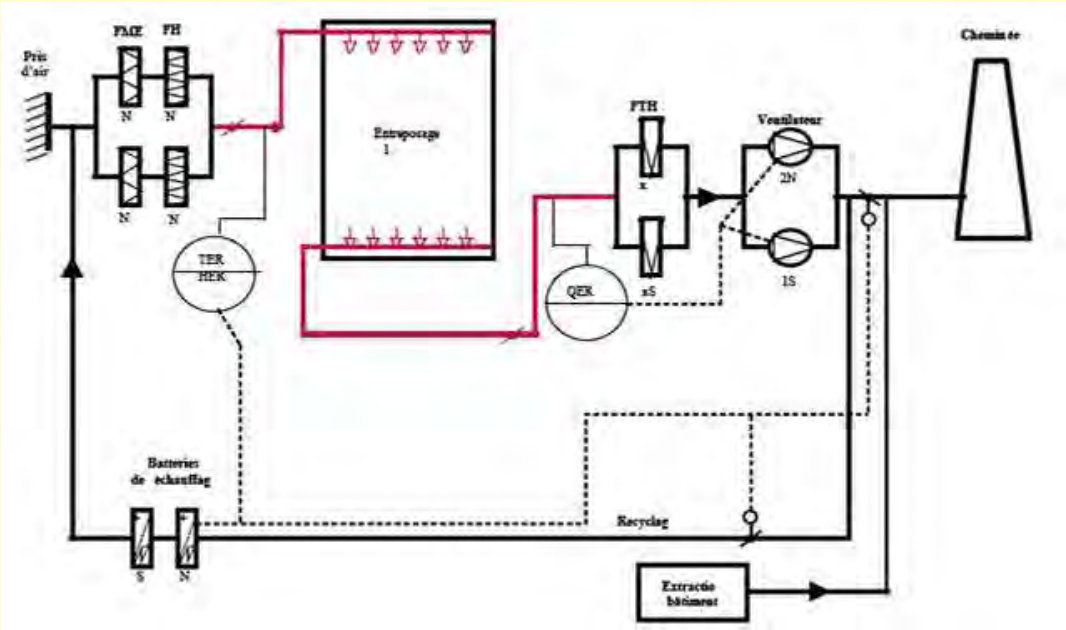


Figure 6.4-10 Schéma de principe du procédé de refroidissement du concept d'entreposage en bâtiment multi-étagé

6.5 Etude de faisabilité de casemates modulaires en béton sur radier

La faisabilité d'une application aux colis de déchets HA du principe NUHOMS® a été étudiée. L'étude a porté sur les colis de la famille F1-3-01 d'une puissance unitaire maximale de l'ordre de 1 500 W, ainsi que les colis des familles F1-3-02 et F1-4-01.

Les caractéristiques résumées de cette option de conception sont :

- un regroupement dans un panier étanche (ou « canister ») de 24 colis primaires CSD-V des familles F1-3-01 et F1-3-01 ou 30 colis primaires de la famille F1-4-01 ;
- le positionnement horizontal des paniers dans des casemates en béton individuelles, construites sur radier avec des éléments préfabriqués ;
- le refroidissement des colis par convection naturelle ;
- la possibilité d'utiliser les casemates pour l'entreposage de colis de stockage ;
- l'utilisation d'un atelier nucléaire pour la mise des colis en panier, puis leur extraction lors du désentreposage ;
- le transfert et la dépose de chaque panier dans sa casemate au moyen d'un emballage de transport interne.

6.5.1 Architecture

Dans cette option, chaque casemate d'entreposage reçoit un panier de regroupement de colis. Les dimensions des casemates peuvent être standardisées pour recevoir indifféremment des colis primaires et de stockage de toutes les familles considérées.

Les casemates sont disposées en alignements (Figure 6.5-1). Les casemates placées dos-à-dos sont espacées d'environ 3 m. Celles situées en vis-à-vis sont distantes de 15 m pour permettre la circulation des moyens de transport interne des paniers. Un module constitué de 208 casemates dont cinq maintenues vides pour faciliter la surveillance, offrant une capacité de 850 à 970 m^3 selon les familles entreposées, occuperait 2,3 hectares (Figure 6.5-1).

Le regroupement des colis dans un panier, et leur retrait de ce panier lors du désentreposage, s'effectuent dans un atelier nucléaire.

<u>Casemates</u>

Chaque casemate est constituée (Figure 6.5-2) :

- d'une structure externe de radioprotection en béton, constituée d'éléments préfabriqués et assemblés sur site ;
- d'une structure interne métallique, support du panier ;
- d'une porte en face avant ;
- de parois métalliques internes locales réalisant une protection thermique de la structure en béton ;
- d'une protection solaire en partie supérieure.

Des orifices d'entrée d'air frais sont ménagés en faces avant et arrière. Ces orifices protégés par une grille métallique sont placés à une hauteur de 500 mm par rapport au sol pour prévenir le risque de colmatage (neige, débris végétaux).

Les casemates assurent la radioprotection des opérateurs susceptibles d'intervenir occasionnellement à proximité ainsi que la protection des colis contre la chute d'avion et les phénomènes météorologiques. Comme dans les options techniques présentées plus haut, la radioprotection dimensionne l'épaisseur de béton (130 cm). En face avant de la casemate, la continuité de la radioprotection est assurée par une porte et par un bouchon de protection biologique inclus dans le panier (voir infra). Le débit de dose à 30 cm peut ainsi être limité à 15 $\mu Sv.h^{-1}$. En complément, la protection des opérateurs et du public implique aussi de clôturer la zone des casemates pour en contrôler l'accès, empêchant de séjourner en permanence à proximité immédiate des casemates.

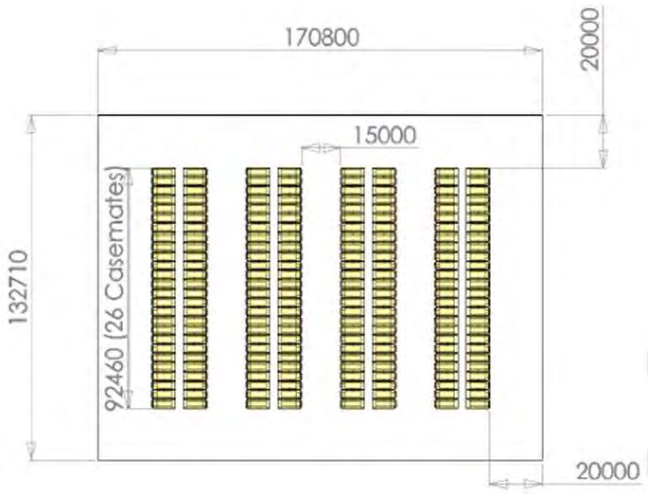


Figure 6.5-1 Schéma d'implantation d'un module (vue de dessus)

Tableau 6.5-1 Dimensions d'une casemate standardisée

	Dimensions	Surface au sol	Volume
Longueur	8,85 m	31,5 m²	172 m³
Largeur	3,65 m		
Hauteur	5,95 m		

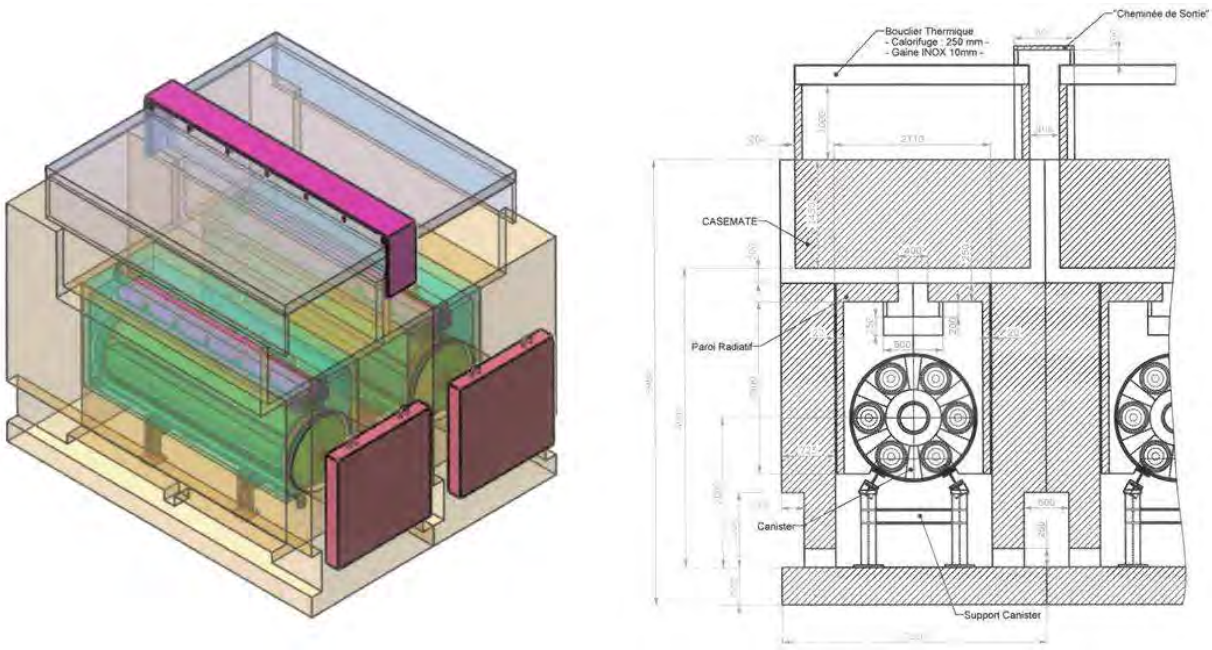


Figure 6.5-2 Schéma et plan (coupe transversale) de casemate

Paniers

Les paniers sont des cylindres de hauteur[172] 5,64 m, de diamètre[173] 1,71 m, de masse à vide 20 tonnes (avec aménagements internes) et de masse en charge 50 tonnes au maximum (Figure 6.5-3). Leur géométrie est compatible avec les colis primaires et de stockage des familles F1-3-01 ou F1-3-02 et F1-4-01.

Ils sont constitués d'une virole en acier, d'un fond épais en acier (sur lequel est fixée la prise de manutention à l'horizontale) et de trois couvercles en partie supérieure : deux couvercles d'étanchéité et un bouchon interne de protection biologique composé de plomb dans une enveloppe en acier. Deux techniques de fermetures ont été envisagées, consistant à visser ou à souder les couvercles d'étanchéité. Les dimensions données dans ce chapitre et les figures correspondent à des couvercles soudés[174].

Le panier étanche protège les colis de la corrosion et constitue un second système de confinement statique, en complément aux colis. Son étanchéité peut être contrôlée grâce à un inertage à l'hélium et à l'espace ménagé entre les deux couvercles d'étanchéité.

Tableau 6.5-2 Caractéristiques des paniers pour chaque type de colis

Colis		Diamètre colis (mm)	Nombre de colis par panier			Masse colis (kg)	Masse par panier (kg)
			Section	Hauteur	Total		
Familles F1-3-01 et F1-3-02	Primaires	430	6	4	**24**	494	11 856
	Stockage	590	5	3	**15**	1 945	29 175
Famille F1-4-01	Primaires	500	6	5	**30**	410	12 300
	Stockage	655	4	4	**16**	1 645	26 320

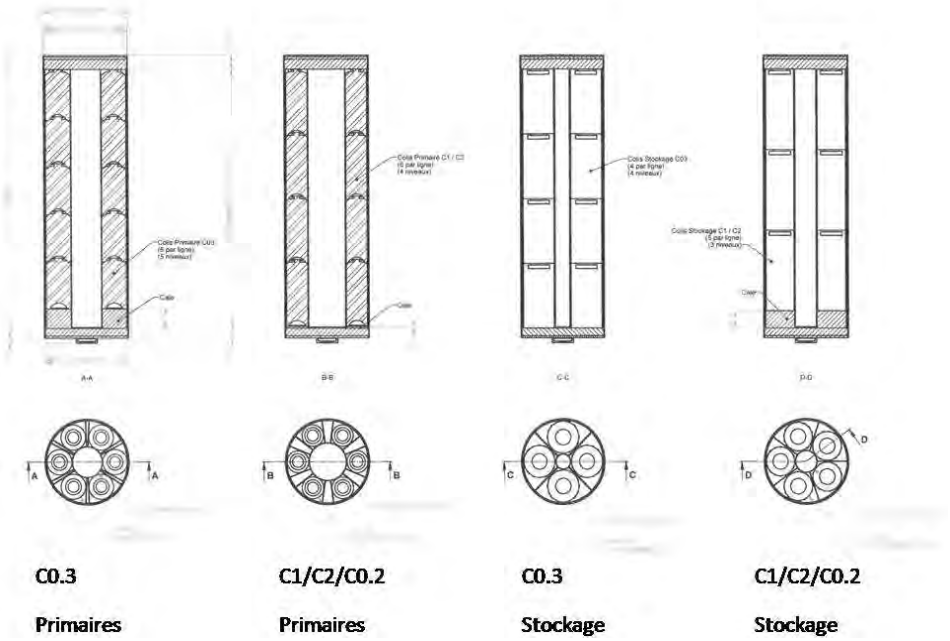


Figure 6.5-3 Plans des paniers et colis à l'intérieur (coupes longitudinales et transversales)

[172] Un empilement de quatre colis des familles F1-3-01 ou F1-3-01 a été retenu de façon analogue à l'emballage de transport TN81.

[173] Le diamètre du panier est dimensionné par l'arrangement des colis de stockage de la famille F1-4-01. Dans le cadre de l'étude de faisabilité, un arrangement de quatre colis de stockage a été préféré à un arrangement de trois pour diminuer le nombre de paniers et augmenter leur surface d'échange thermique.

[174] Un panier à couvercle vissé apporterait l'avantage d'être réutilisable. Par ailleurs, son cycle de fermeture serait plus rapide. Par contre la nécessité d'une bride épaisse à double portée augmenterait les dimensions du panier et des casemates.

Atelier de chargement - déchargement des paniers

L'atelier de chargement-déchargement des paniers comprend :

- une zone de réception de l'emballage de transport interne (repère A sur la Figure 6.5-4). Les paniers vides équipés sont également réceptionnés dans cette zone ;
- une cellule de fermeture (ou d'ouverture) et de contrôle d'étanchéité des paniers (repère B) ;
- des locaux de mise en place des colis dans les paniers (repère C) ;
- des locaux de ventilation[175] (repère D).

La radioprotection des opérateurs et du public pendant les opérations de chargement et de déchargement des paniers est assurée par les voiles en béton de l'atelier (Tableau 6.5-3).

Dans le cas d'une implantation sur le centre de stockage, cet atelier serait intégré au bâtiment regroupant l'ensemble des activités nucléaires de surface (cf. chapitre 4).

Tableau 6.5-3 Epaisseurs de protection radiologique du génie civil de l'atelier de chargement-déchargement des paniers

Elément de l'entreposage	Epaisseurs de béton	Débits d'équivalent de dose
Voiles extérieurs des cellules actives	160 cm	0,5 µSv.h^{-1} à 30 cm
Voiles entre les cellules actives et les postes de travail permanent	145 cm	3 µSv.h^{-1} à 30 cm

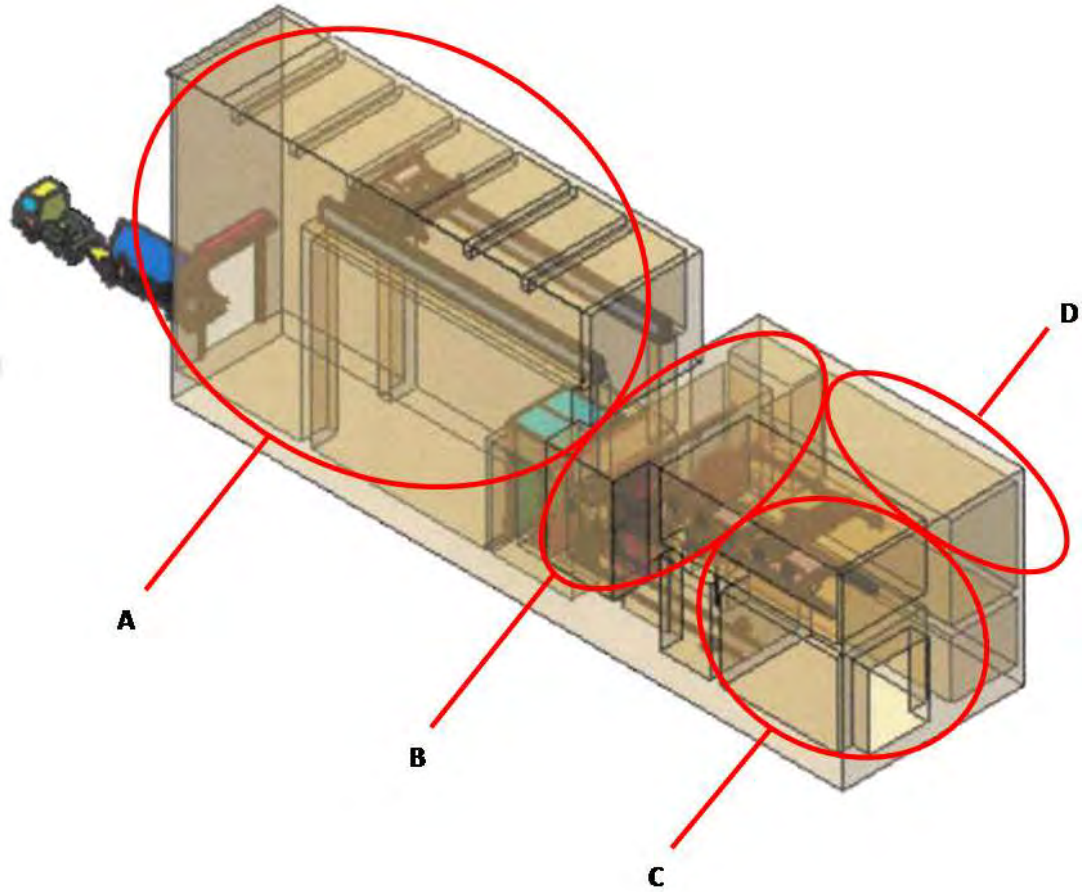


Figure 6.5-4 Schéma du bâtiment de chargement / déchargement des paniers

[175] L'atelier est équipé d'une ventilation nucléaire assurant un confinement dynamique par une cascade de pressions et dépressions.

Emballage de transport interne

L'emballage de transport interne assure les transferts individuels de panier entre l'atelier de chargement-déchargement et les casemates. D'une masse à vide d'environ 80 tonnes, il possède une virole cylindrique épaisse multicouche assurant la radioprotection (Tableau 6.5-4), un fond épais soudé et un couvercle supérieur boulonné. Il est équipé de rails internes permettant le glissement du panier en position horizontale. Deux tourillons en partie supérieure permettent la manutention verticale de l'emballage. Ces deux tourillons, en plus de deux autres en partie inférieure, permettent le supportage et l'arrimage en position horizontale de l'emballage pendant le transport.

Le véhicule de transport interne site est constitué d'une remorque[176] de charge roulante de 130 tonnes et d'un tracteur.

Tableau 6.5-4 Epaisseurs de protection radiologique de l'emballage de transport interne pour un débit de dose de 15 µSv.h^{-1} à 30 cm

Epaisseurs de protections latérales
2 cm d'acier inox
18 cm de plomb
32 cm de composé neutrophage[177]
0,3 cm de cuivre
0,9 cm de PN 7
7 cm d'acier non allié[178]

6.5.2 Manutention

Les opérations de manutention se décomposent en deux étapes principales :

- la mise en place des colis dans le panier ou leur extraction, réalisées dans l'atelier de chargement-déchargement des paniers;
- le transfert puis la dépose du panier dans les casemates, ou leur retrait, au moyen de l'emballage de transport interne.

Dans l'atelier de chargement-déchargement des paniers (Figure 6.5-5), l'emballage de transport interne est levé en position verticale par un pont de capacité 300 kN. Un panier vide est ensuite introduit à l'intérieur de l'emballage, puis ce dernier est transféré par un chariot[179] ad hoc sous la cellule de manutention des colis, à laquelle il est accosté. Les colis sont alors manutentionnés un par un par un pont[180] de capacité de levage de 40 kN qui les place à l'intérieur du panier.

[176] En position de travail, la remorque s'appuie sur quatre vérins. Le châssis support de l'emballage est fixé sur le plateau de la remorque. Il permet le réglage en hauteur de l'axe de l'emballage pour alignement avec les structures support des casemates.

[177] Le neutrophage peut être réalisé à partir d'un matériau organique riche en hydrogène (polyéthylène), de résine polyester, d'alumine et de colémanite (matériau boré).

[178] La dernière couche d'acier permet d'atténuer les rayonnements gamma secondaires émis dans la couche de neutrophage.

[179] Le chariot de transfert assure la translation rectiligne de l'emballage de transport interne et le réglage (grâce à quatre vis vérins) de l'horizontalité de la face supérieure de l'emballage. Il est composé d'un châssis recevant quatre galets de roulement, dont deux sont motorisés (motoréducteurs). La face supérieure du châssis porte un système de bridage de l'emballage par l'intermédiaire de tourillons inférieurs.

[180] Le pont de chargement des colis est équipé d'un chariot de translation muni d'une double motorisation, d'un sous-ensemble de levage doté également d'une double motorisation, avec deux câbles enroulés sur deux tambours et un frein de sécurité sur chaque tambour, d'une pince de préhension à double motorisation et

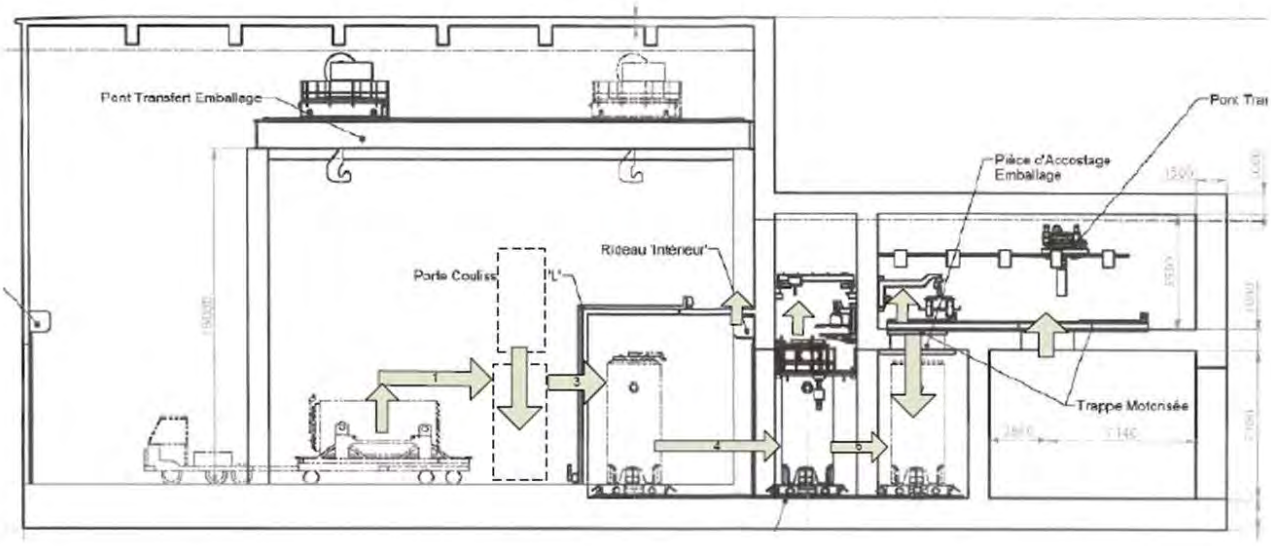
Après chargement complet du panier, son bouchon de protection radiologique est mis en place puis l'emballage est transféré au poste de fermeture des paniers.

La pose des couvercles des paniers et le contrôle d'étanchéité peuvent être effectués par des opérateurs ou automatisés ; la radioprotection est réalisée par l'emballage de transport interne et le bouchon de protection du panier.

Après pose du couvercle de l'emballage de transport interne et vissage, ce dernier est déposé horizontalement sur la remorque de transport interne pour être acheminé vers une casemate d'entreposage, à laquelle il est accosté.

Un système de manutention horizontale du panier permet de saisir ce dernier et de le pousser dans la casemate (ou de l'en retirer). Il est composé essentiellement d'un vérin hydraulique à double effet embarqué sur un chariot mobile.

Avec l'option de paniers à couvercles soudés, l'option étudiée se caractérise par une accessibilité moyenne aux colis entreposés. Une opération de retrait de colis entreposés nécessite en effet une destruction du panier, qui constitue alors un déchet.



1. Basculement et dépose à la verticale de l'emballage de transport interne site entreposage
2. Introduction d'un panier vide dans l'emballage
3. Chargement de l'emballage muni du panier sur le chariot de transfert
4. Transfert de l'emballage au poste de fermeture/ouverture des paniers
5. Transfert de l'emballage au poste de chargement colis
6. Retrait du bouchon de protection biologique
7. Prise d'un colis
8. Chargement du colis dans le panier (étapes 7 et 8 itérées jusqu'au chargement complet)

Figure 6.5-5 Synoptique de manutention dans l'atelier de chargement-déchargement

6.5.3 Refroidissement des paniers et de la casemate

En situation d'entreposage, les paniers sont refroidis par convection naturelle. Le flux d'air frais introduit par les prises d'air est distribué par un plénum entre deux circuits (Figure 6.5-6).

Le flux d'air principal circule au contact du panier par tirage naturel. Pour protéger le béton de la paroi supérieure de la casemate du rayonnement thermique des colis, un calorifuge d'épaisseur 250 mm est placé horizontalement à 200 mm en-dessous de cette paroi (Figure 6.5-7).

---

système de verrouillage mécanique, adaptée à la géométrie et masse du colis à manutentionner, et de dispositifs d'ultime secours commandés à distance pour les opérations de translation et d'ouverture de pince.

Le flux d'air principal circule entre ce calorifuge et la paroi supérieure avant de sortir de la casemate, assurant le refroidissement du béton de la paroi supérieure. De plus, un bouclier thermique est disposé au-dessus de la casemate pour limiter l'impact du rayonnement solaire.

Le flux d'air secondaire circule dans l'espace situé entre les parois latérales de la casemate et un calorifuge d'épaisseur 100 mm placé verticalement à une distance de 20 mm du béton ; il participe ainsi au refroidissement des parois latérales de béton.

Le Tableau 6.5-5 indique les températures des colis, du panier, des bétons et du calorifuge calculées pour des colis entreposés de puissance thermique unitaire de 1 500 W, dans un cas pénalisant[181]. Les calculs montrent que la température maximale dans le béton constitue le critère dimensionnant, limitant en pratique le domaine d'application de l'option étudiée à une puissance de 1 500 W.

Une récupération de l'énergie dissipée par les colis apparaît peu envisageable avec un refroidissement par convection naturelle, qui présente en contrepartie des avantages de passivité et de souplesse.

Il est à noter que l'option étudiée ne permet pas de contrôler l'hygrométrie au contact des paniers, renvoyant la question de leur durabilité au choix d'un alliage passivable.

Tableau 6.5-5 Evaluation des températures maximales en conditions normales et extrêmes avec une puissance thermique unitaire des colis de 1 500 W

	Conditions normales température extérieure de 35 °C, flux solaire de 400 W.m^{-2}		**Conditions extrêmes** température extérieure de 37,5 °C, flux solaire de 400 W.m^{-2}	
	Température calculée	Critères	Température calculée	Critères
Air en sortie de casemate	56°C	-	58,7	-
Béton (partie supérieure)	**61,7°C**	**70°C**	**64,4°C**	**80°C**
Béton (parties latérales)	**67,6°C**	**70°C**	**70,4°C**	**80°C**
Calorifuge	123,8°C	-	126,8°c	-
Panier	179,6°C	-	181,8°C	-
Cœur du verre	**416°C**	**450°C**	**417°C**	**510°C**

[181] On considère notamment une paroi mitoyenne entre deux casemates identiquement chargées de colis. La face extérieure du mur est donc considérée adiabatique.

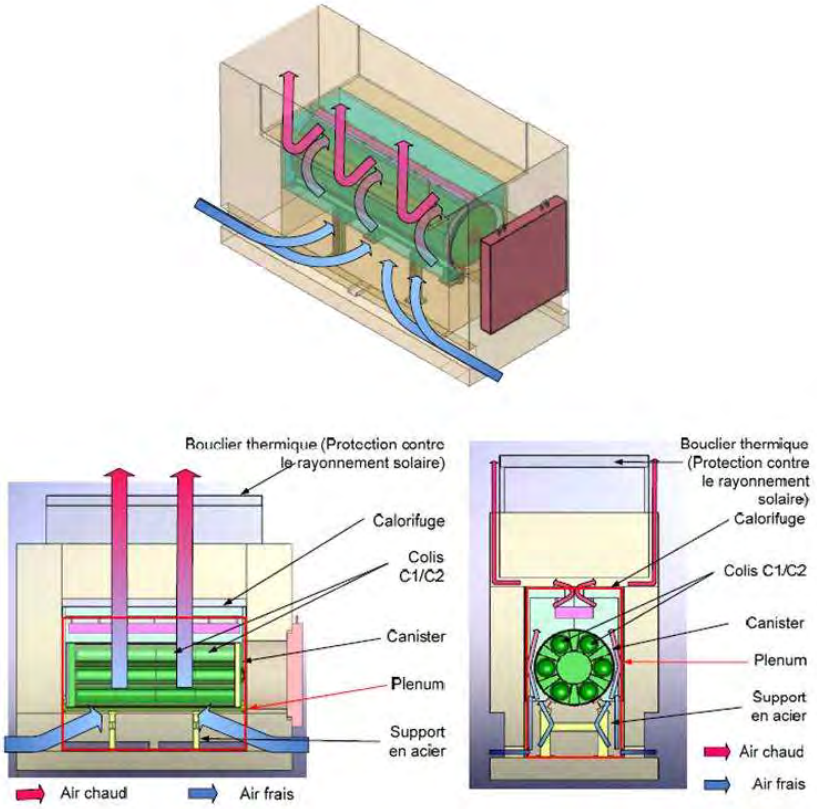


Figure 6.5-6 Schémas de principe du procédé de refroidissement d'une casemate

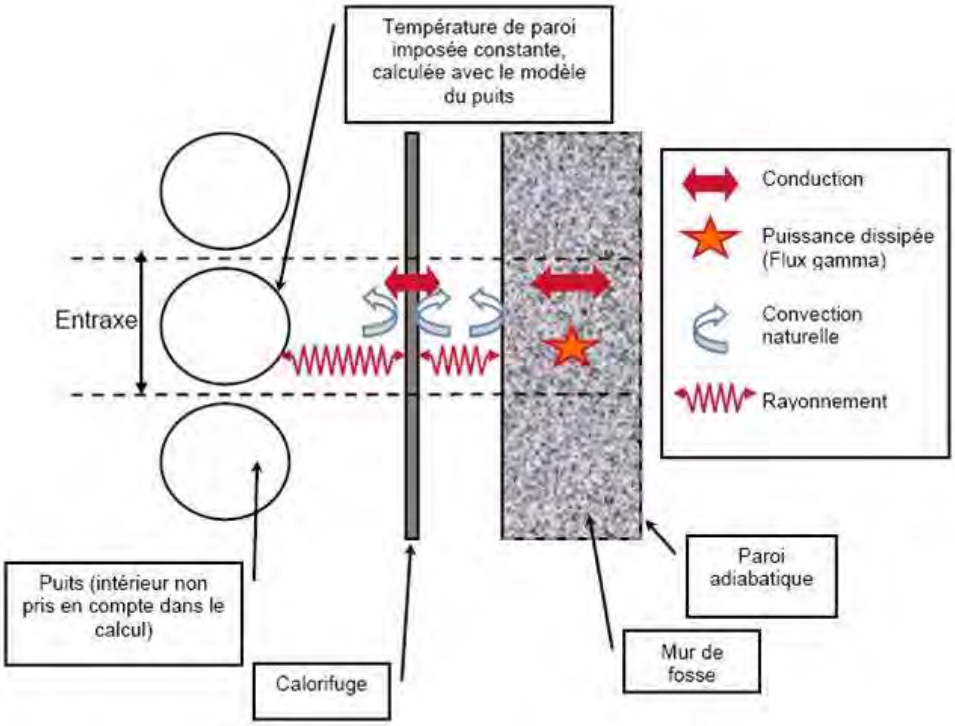


Figure 6.5-7 Schéma de principe des flux thermiques en partie haute de la casemate

6.6 Etude de faisabilité d'un d'entrepôt à faible profondeur construit à ciel ouvert

Pour évaluer la faisabilité d'une installation d'entreposage à faible profondeur construite à ciel ouvert, une architecture en puits verticaux a été retenue. Du point de vue thermique, cette option a été étudiée pour l'entreposage de colis de la famille F1-3-01 de puissance thermique unitaire de 1 200 W. Cependant les solutions présentées permettraient de recevoir des colis jusqu'à 2 000 W. Les familles F1-3-02 et F1-4-01 ont également été prises en compte.

Les caractéristiques résumées de l'architecture étudiée (Figure 6.6-1) sont :

- une construction à ciel ouvert par des méthodes traditionnelles de génie civil, en séparant totalement les phases de travaux et les phases d'exploitation ;
- l'application du principe d'empilement des colis en puits verticaux, sans regroupement ;
- un refroidissement des colis par convection d'air couplée avec des échangeurs air/eau permettant l'évacuation par eau de la chaleur jusqu'en surface, limitant le débit d'air à introduire dans les ouvrages enterrés.

Outre l'impact d'une construction à faible profondeur, cette étude explore une alternative au regroupement des colis pour permettre l'accueil de colis de stockage en lieu et place de colis primaires. Cette alternative présente l'avantage de limiter les masses à manutentionner, mais offre moins de flexibilité pour la reconfiguration de l'entrepôt ; elle serait également envisageable avec une construction en surface.

L'étude s'est fondée sur le contexte géologique de Meuse/Haute-Marne, avec une hypothèse d'implantation dans des marnes comparables aux marnes à exogyres supérieures, à une profondeur comprise entre 20 et 75 m, sous le niveau de la nappe phréatique.

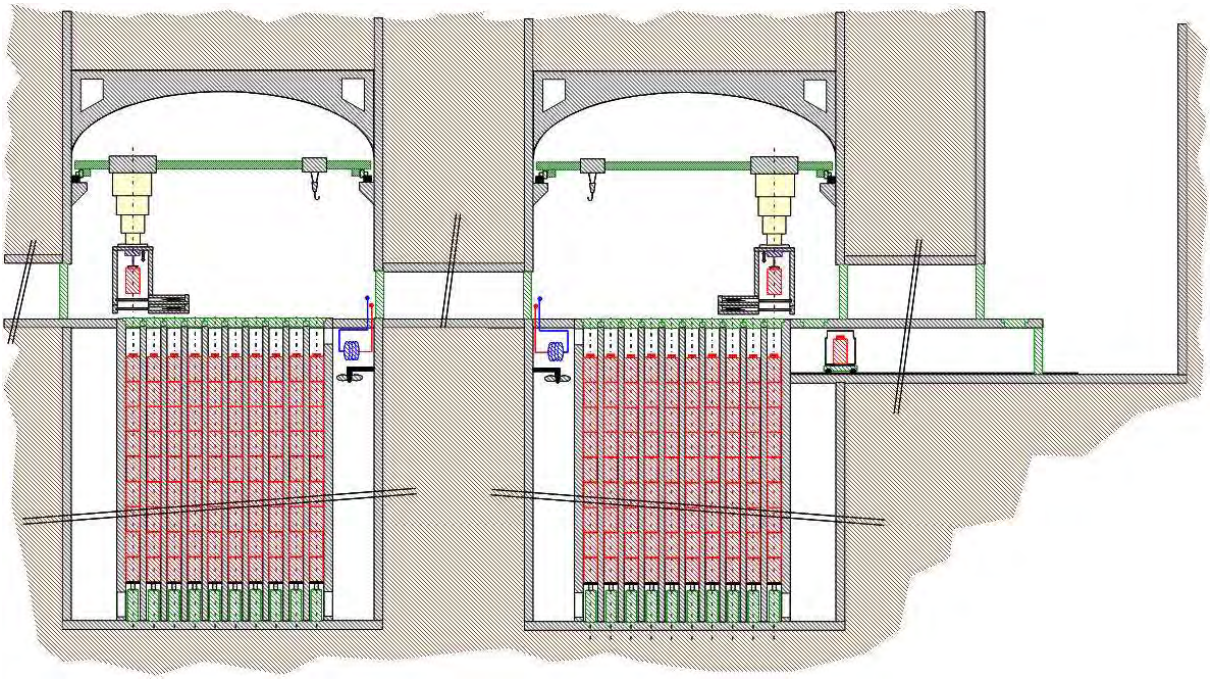


Figure 6.6-1 Schéma de principe d'un module d'entreposage à faible profondeur construit à ciel ouvert

6.6.1 Architecture et génie civil

Description d'un module d'entreposage

Le module d'entreposage étudié est constitué d'une excavation cylindrique d'axe vertical. La section circulaire de l'excavation favorise sa stabilité mécanique. Pour une capacité jusqu'à 1 170 m^3 (6 688 colis primaires), l'ensemble de la structure présente un diamètre intérieur de 31 m (Figure 6.6-2) et une hauteur totale d'environ 50 m (Figure 6.6-3). Elle comprend une zone de manutention au sommet, des zones de ventilation périphériques, un plénum inférieur et une zone centrale qui permet l'entreposage des colis de déchets dans des puits. La zone de manutention est desservie par un pont polaire d'une portée de 30 m. Cette grande portée est favorisée par la manutention des colis à l'unité, qui limite la masse de la hotte utilisée pour cette manutention (voir infra).

Plusieurs types de modules ont été prédimensionnés :

- un module comporte des puits pour l'entreposage des colis des familles F1-3-02 et F1-4-01 sous forme de colis primaires ou de colis de stockage, ainsi que des puits pour l'entreposage des colis de la famille F1-3-01 uniquement sous forme de colis primaires ;
- un module comporte 130 puits pour l'entreposage des colis de la famille F1-3-01 sous forme de colis primaires ou de colis de stockage, le reste des puits du module étant destiné aux seuls colis primaires de cette famille ;
- d'autres modules ont été étudiés pour entreposer la famille F1-3-01 uniquement sous forme de colis primaires, ce qui leur confère une capacité d'entreposage maximale.

Dans les modules prévus pour recevoir des colis de stockage en remplacement de colis primaires, le diamètre des puits concernés est augmenté pour être compatible avec celui des conteneurs de stockage. L'entreposage de colis primaire reste malgré tout possible dans ces puits en plaçant au préalable les colis dans des paniers unitaires dédiés. Les modules reconfigurables disposent de moins de puits d'entreposage que les modules dédiés aux seuls colis primaires, et leur capacité en colis primaires est donc réduite. Les puits d'entreposage non surdimensionnés à l'origine ne pourront recevoir ultérieurement des colis de stockage, rendant l'option d'un entrepôt pour colis unitaires moins souple que l'option d'un regroupement en casiers ou paniers.

Un module de 1 170 m^3 contient 362 puits d'entreposage d'une hauteur utile de 27 m permettant de recevoir chacun jusqu'à 19 colis primaires. Parmi ces puits, 10 servent de tampon pour permettre des déplacements de colis lorsque l'on souhaite vider tout ou partie d'un puits à des fins de surveillance. La fabrication des puits d'entreposage et de leurs structures de supportage à partir d'acier recyclé pourrait être étudiée dans cette architecture.

L'accès principal aux modules est réalisé par un puits commun à l'ensemble de l'installation, de diamètre 23 m. A partir de cet accès, deux galeries superposées relient chacun des modules : une galerie d'exploitation est destinée à l'acheminement des colis de déchets, tandis qu'une galerie de manutention permet le transfert des équipements, du matériel et sert d'accès pour le personnel. Le dispositif est complété par des puits de ventilation et de servitudes (Figure 6.6-4).

Les marnes à exogyres supérieures considérées pour l'étude sont globalement très peu perméables (10^{-9} à 10^{-10} m.s^{-1}). En revanche les calcaires du Barrois sus-jacents sont localement aquifères. La nécessité d'une protection de l'entrepôt vis-à-vis d'éventuelles venues d'eau dépendrait des conditions hydrogéologiques locales et de l'implantation des ouvrages par rapport au toit des marnes. Sans préjudice de cette nécessité, l'architecture retenue pour l'étude offre une double enveloppe, séparée par les zones de ventilation périphériques. La première enveloppe, en contact avec le terrain, permettrait si nécessaire de contrôler les éventuelles percolations d'eau, de les recueillir dans des regards instrumentés et d'intervenir le cas échéant sur l'étanchéité du revêtement externe.

L'enceinte constituée par la seconde enveloppe autour des puits éviterait de tout risque de contact des colis avec d'éventuelles infiltrations.

A l'exception de la zone d'entreposage, située à l'intérieur de la seconde enveloppe, et du plenum inférieur, l'ensemble du module en exploitation peut être rendu visitable pour sa surveillance et sa maintenance éventuelle. La dalle située au-dessus des puits d'entreposage assure la protection radiologique permanente des opérateurs intervenant dans la zone de manutention, suivant le même principe que l'étude de faisabilité de l'architecture en puits verticaux en surface présentée plus haut. Les voiles latéraux de béton autour des puits protègent du rayonnement les zones périphériques situées entre les deux enveloppes.

Méthode de construction

L'excavation accueillant un module d'entreposage est conçue pour une réalisation à ciel ouvert.

Les terrassements dans les formations superficielles (calcaires du Barrois) peuvent être réalisés à l'abri de l'eau souterraine au moyen de parois moulées d'une épaisseur de 1,10 m, fichées sur au moins 5 m dans les marnes à exogyres supérieures. Un bulbe d'injection autour de la fiche de la paroi moulée empêcherait tout contournement hydraulique. Les parois moulées évitent le risque de rabattement de la nappe superficielle des calcaires du Barrois durant les travaux.

La fouille étant de grande dimension, l'excavation peut être réalisée à l'aide d'engins de terrassement, voire par abattage à l'explosif. Lors de la traversée de la formation des calcaires du Barrois, la tenue de la paroi peut nécessiter la mise en place de tirants d'ancrage.

Sous ces parois moulées, l'excavation est réalisée de manière traditionnelle en mettant en place un soutènement[182] après chaque passe de creusement.

Les puits de ventilation/servitude peuvent être réalisés par fonçage à l'explosif ou à l'aide de technologies plus récentes d'abattage mécanisé en puits. Ils sont étanchés sur toute la hauteur des formations aquifères.

Les diverses galeries souterraines reliant les modules sont creusées par abattage mécanique ou en utilisant des explosifs.

A la fin des travaux de génie civil, la partie supérieure de l'excavation, située au-dessus de la structure, peut être remblayée avec des matériaux excavés sur le site, en mettant en place sur au moins 5 m un remblai argileux avec une granulométrie étendue, puis un remblai tout-venant spécifié pour limiter les tassements. Ce remblai est couvert en surface afin de limiter l'apport en eaux météoriques.

Agencement possible et réalisation progressive des modules d'entreposage

Une architecture d'installation comportant six modules à terminaison a été étudiée, fondée sur une implantation rayonnante autour d'un accès central (Figure 6.6-5). Les modules sont espacés de 70 mètres pour limiter les interactions.

Chacun des six puits de ventilation/servitudes peut être mutualisé entre deux modules, renforçant la robustesse de l'installation vis-à-vis de situations incidentelles (voir infra). Le réseau de galeries est conçu pour secourir la ventilation en cas d'incident, et permettre l'évacuation du personnel en toute situation.

L'architecture de l'installation autorise la construction d'un nouveau module pendant l'exploitation d'un module antérieur.

[182] La contrainte principale verticale est d'environ 1,35 MPa, la contrainte horizontale d'environ 0,6 MPa, pour une résistance à la compression simple des marnes de l'ordre de 17 MPa.

Avant la mise en exploitation de l'installation (repère 1 sur la Figure 6.6-6), l'accès central est construit, ainsi qu'un premier module, l'ensemble des galeries reliant l'accès central à ce module, les deux puits de ventilation/servitudes situés de part et d'autre du premier module et les galeries devant relier ultérieurement ce module avec les modules voisins. Après la mise en exploitation, chaque phase de construction d'un nouveau module (repères 2 et 3) comprend la réalisation de ce module, d'un puits de ventilation/servitudes et les galeries associées. La construction successive des différents modules peut être réalisée en totale autonomie d'accès par rapport à l'accès d'exploitation, en utilisant un puits de ventilation/servitudes pour l'accès aux travaux.

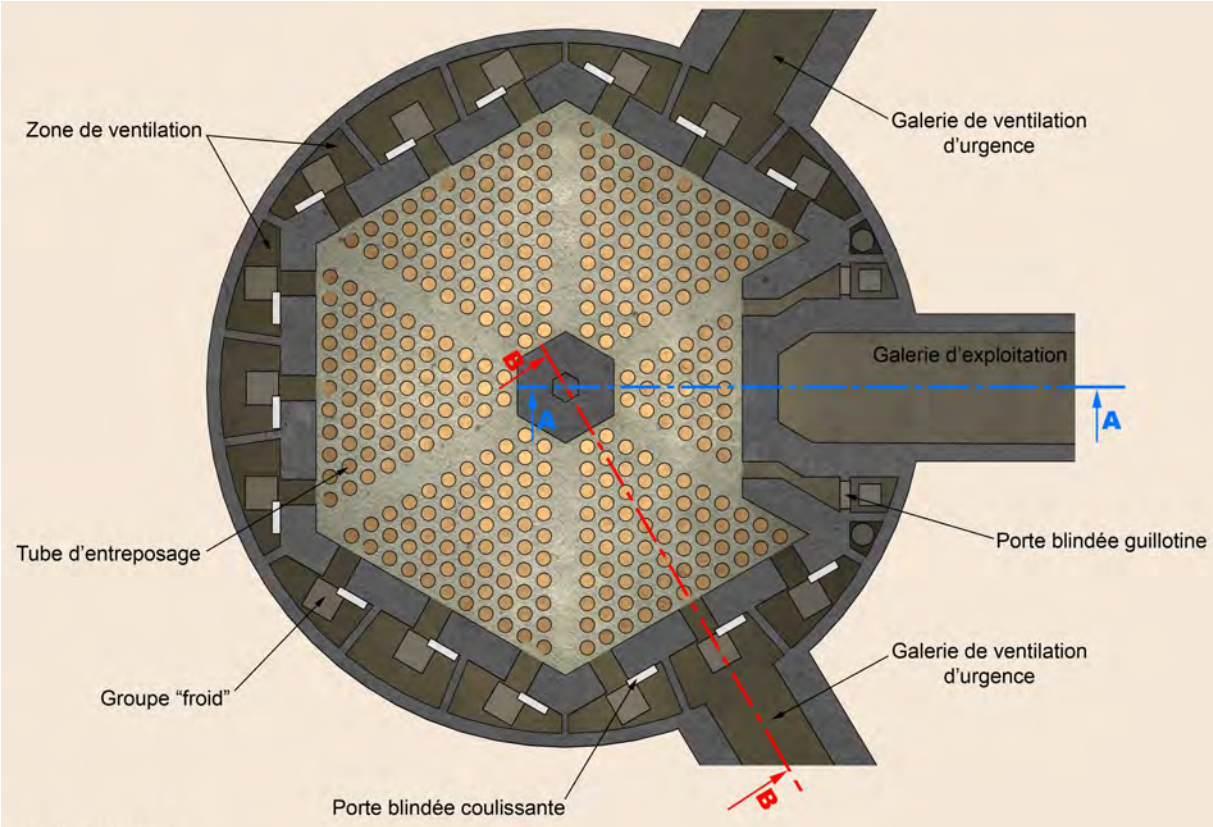


Figure 6.6-2 Coupe horizontale d'un module au niveau de l'espace de manutention

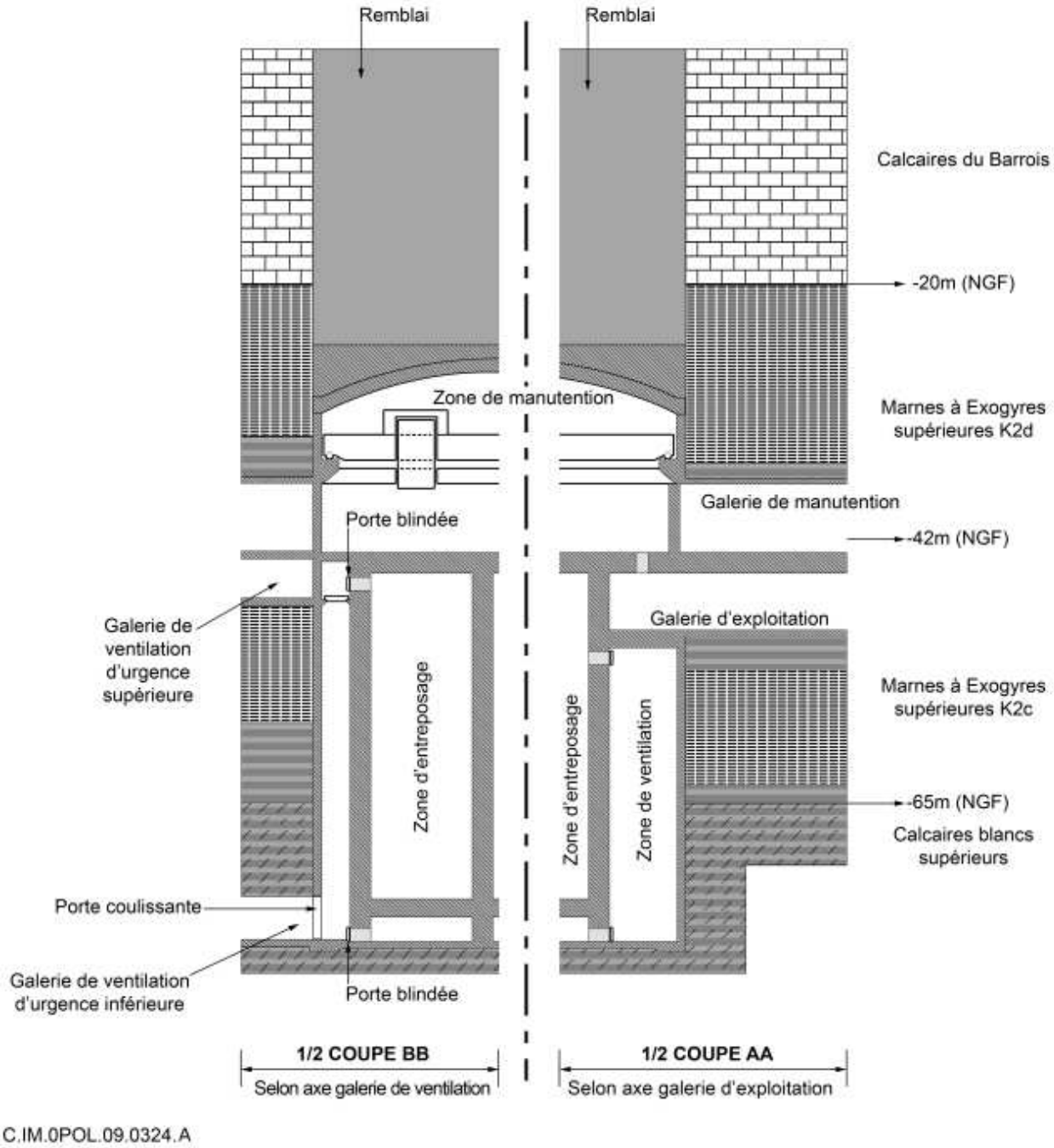


Figure 6.6-3 Demi-coupes verticales d'un module

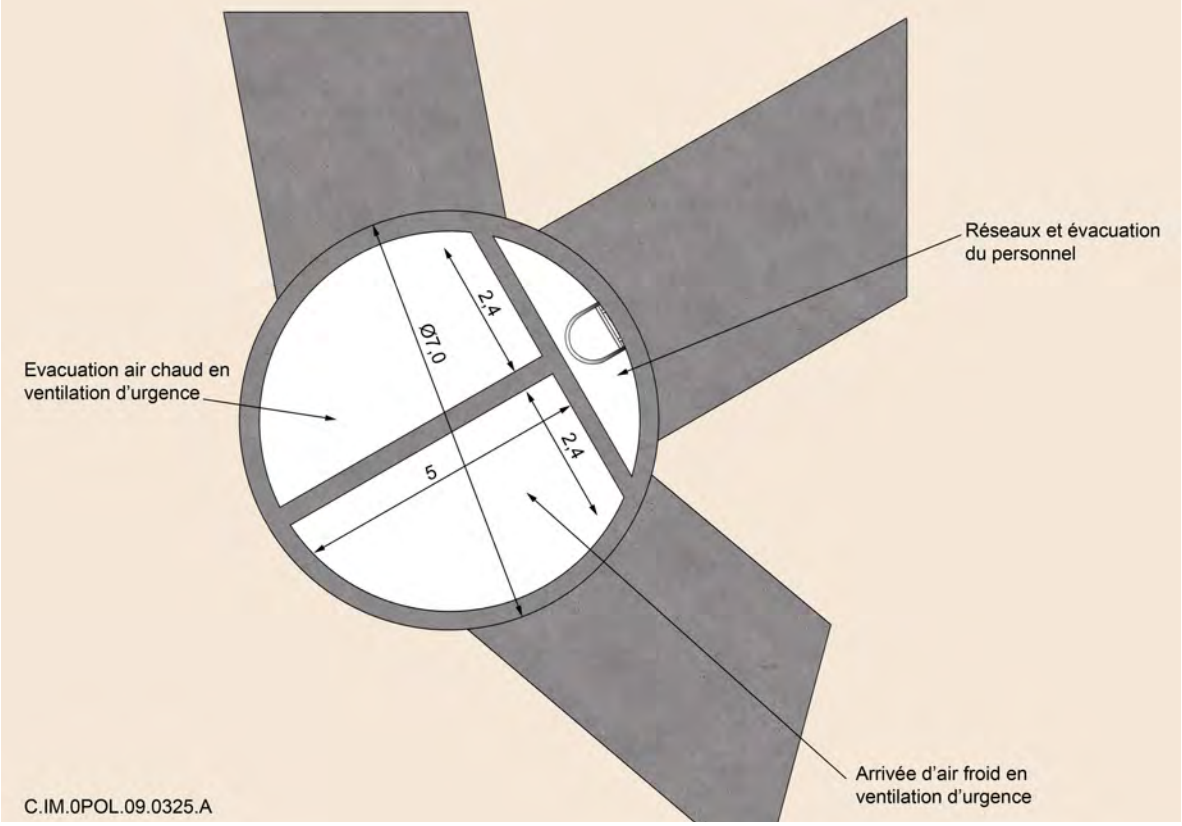


Figure 6.6-4 Cloisonnement des puits de ventilation et de servitudes en trois compartiments

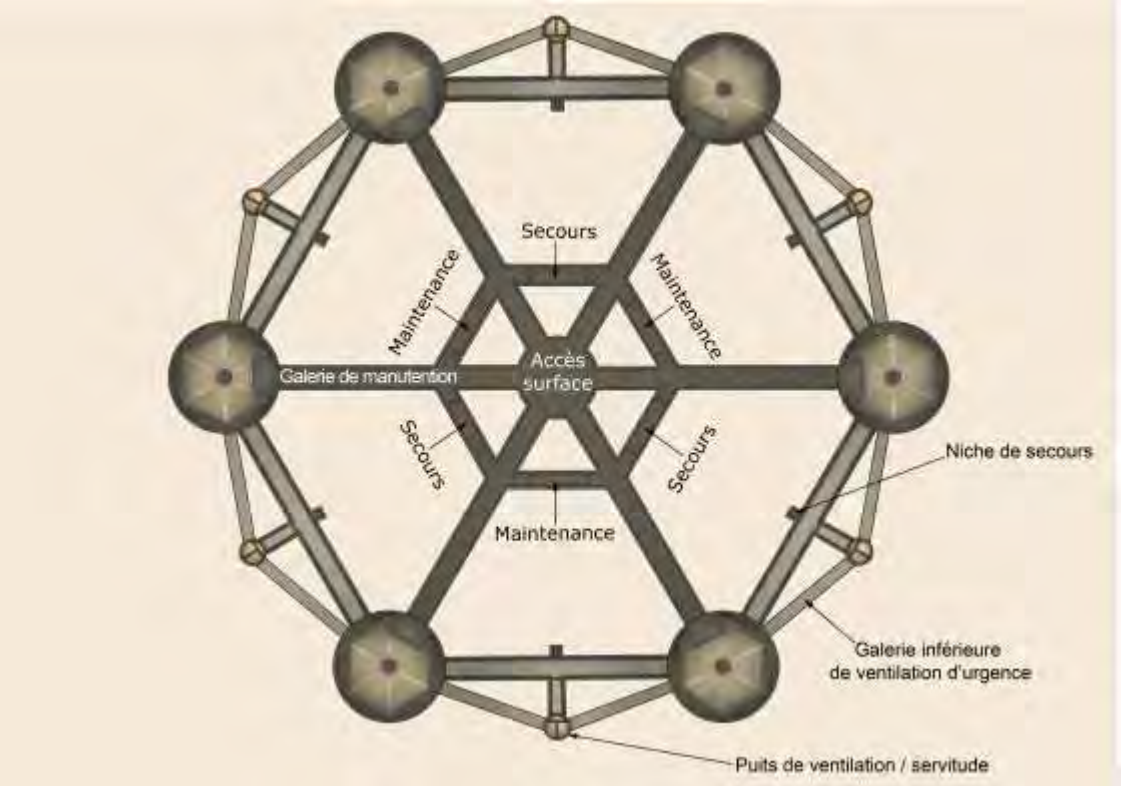


Figure 6.6-5 Exemple d'agencement de modules d'entreposage autour d'une zone centrale

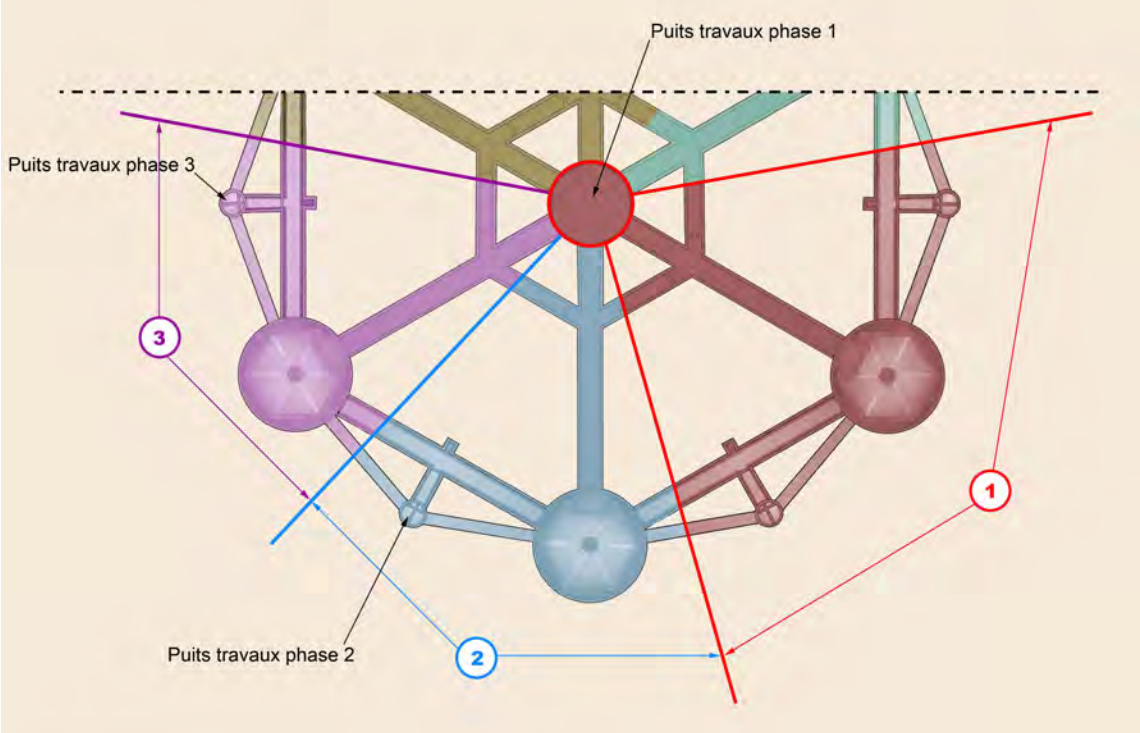


Figure 6.6-6 Schéma de principe de la construction de l'installation par modules

6.6.2 Manutention des colis

Pour être mis en entreposage, les colis sont acheminés sous emballage blindé par les galeries d'exploitation jusqu'à un module d'entreposage. Ils sont ensuite descendus individuellement dans un puits d'entreposage à l'aide d'une hotte classique, dotée d'un treuil muni d'un grappin amovible pour la préhension des colis primaires ou des colis de stockage et d'un opercule coulissant en partie inférieure. Cette hotte est suspendue au vérin hydraulique du pont polaire de la zone de manutention du module (Figure 6.6-7). Dans la suite on décrit plus en détail la séquence de mise en entreposage d'un colis, le retrait d'un colis dans le cadre de la surveillance ou du désentreposage procédant par inversion du processus.

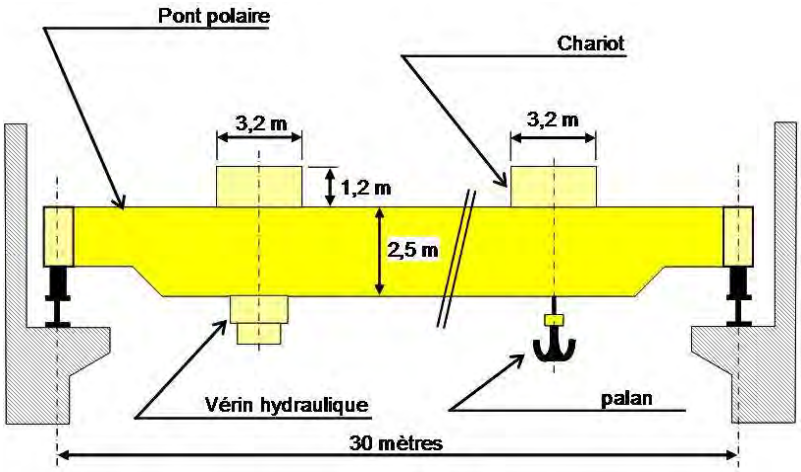
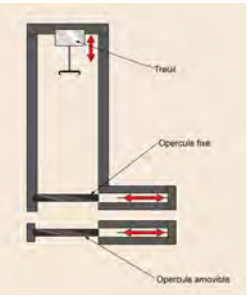


Figure 6.6-7 Pont polaire

Préparation d'un puits d'entreposage

Afin de minimiser la masse de la hotte compte tenu de la portée du pont polaire, l'étude a retenu de mettre en place un opercule de radioprotection à tiroir au-dessus du puits devant accueillir le colis. Cette opération assure la continuité de la protection biologique dans la zone de manutention. La hotte de manutention saisit l'opercule mobile à son poste de dépose et le positionne au dessus du puits à exploiter. Le bouchon de protection biologique fermant le puits peut alors être retiré (Figure 6.6-8) et déposé à l'écart des puits (Figure 6.6-9).



Principe de la hotte de manutention et de l'opercule mobile

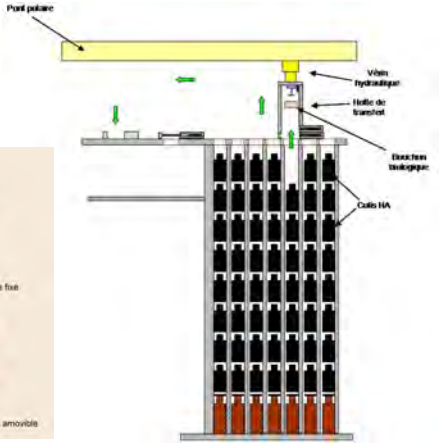


Figure 6.6-8 Retrait du bouchon (opercule mobile en place)

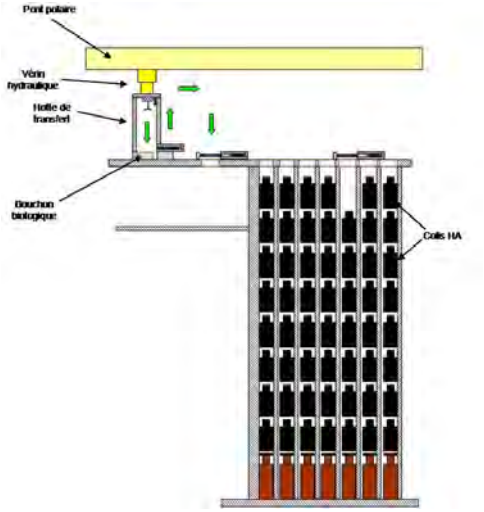


Figure 6.6-9 Dépose du bouchon

Transfert d'un colis jusqu'au module d'entreposage

L'emballage blindé permettant d'acheminer le colis jusqu'au module d'entreposage est un cylindre de diamètre intérieur 70 cm. Cet emballage est chargé et déchargé verticalement. Il est équipé d'un amortisseur de chute de type bloc en nid d'abeilles (Figure 6.6-10).

Il est déplacé dans les galeries d'exploitation par un chariot de transfert automoteur électrique. En cas de défaillance de ce dernier, un chariot « lièvre » permet de rapatrier l'ensemble jusqu'à une zone de maintenance.

Parvenu au module d'entreposage, l'emballage est accosté sous dalle pour un déchargement par la hotte de manutention.

Dépose du colis dans le puits d'entreposage

Après saisie du colis dans l'emballage de transfert, déplacement de la hotte au droit du puits d'entreposage puis ouverture de l'opercule de la hotte et de l'opercule mobile positionné sur le puits d'entreposage, le grappin de la hotte descend le colis dans le puits (Figure 6.6-11).

Le risque de chute de colis est réduit d'une part par la présence de dispositifs redondés et d'autre part par la présence d'amortisseurs intermédiaires et en fond de puits. En cas de perte d'énergie, les dispositifs de préhension de colis restent fermés et assurent le maintien en position du colis jusqu'au retour de l'énergie. Il est à noter que les amortisseurs prévus en fond de puits ou les amortisseurs intermédiaires doivent être adaptés au type de colis entreposé.

Lorsque le puits a été complètement rempli, le bouchon de protection biologique est replacé en tête de puits et l'opercule mobile retiré.

Principe de l'emballage blindé sur chariot automoteur

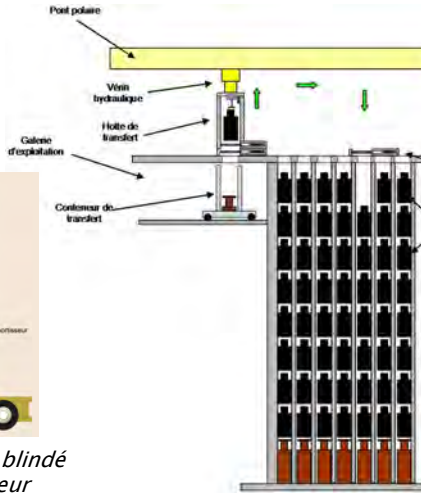


Figure 6.6-10 Déchargement de l'emballage blindé de transfert par la hotte

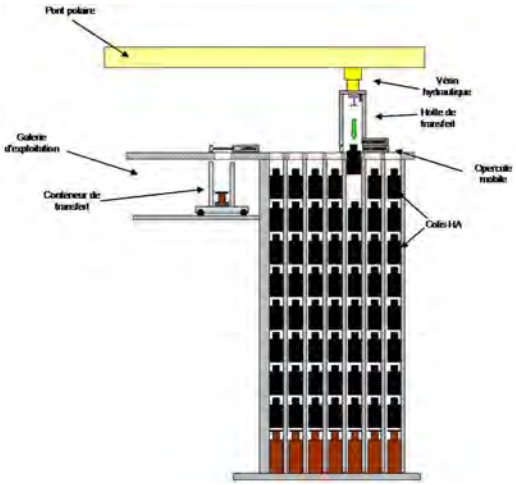


Figure 6.6-11 Dépose du colis dans un puits d'entreposage

6.6.3 Ventilation

<u>Evacuation de la puissance thermique des colis</u>

L'évacuation de la chaleur dégagée par les colis repose sur une circulation de l'air en circuit quasi-fermé à l'intérieur de la zone d'entreposage et sur un refroidissement de cet air par des échangeurs air/eau. Dans la zone d'entreposage, de petits ventilateurs (ou circulateurs) acheminent l'air refroidi par les échangeurs air/eau jusqu'au plénum inférieur de la zone d'entreposage. De là, l'air remonte à l'intérieur des puits d'entreposage où il s'échauffe au contact des colis, puis retourne via le plénum supérieur vers les échangeurs air/eau (Figure 6.6-12).

L'eau réchauffée dans les échangeurs air/eau chemine vers la surface dans des canalisations implantées dans les galeries entre modules et dans les puits de ventilation/servitudes (Figure 6.6-13). Ces réseaux d'eau sont ségrégués pour assurer, en cas de perte d'un puits de ventilation/servitudes, la continuité de fonctionnement du refroidissement. L'eau circule en circuit fermé. En surface, elle peut restituer la chaleur qu'elle transporte au moyen d'échangeurs (par exemple des aéroréfrigérants secs).

Le pré-dimensionnement de l'installation effectué dans le cadre de l'étude permet de mettre hors fonctionnement jusqu'à trois échangeurs d'un même module, sur un nombre total de 17, pour les situations de panne ou la maintenance.

En cas de panne de l'ensemble des ventilateurs et circulateurs, le système peut encore fonctionner en convection naturelle, à condition que des réserves d'eau froide soient disponibles en surface. Les températures augmentent alors, tout en restant dans les limites spécifiées.

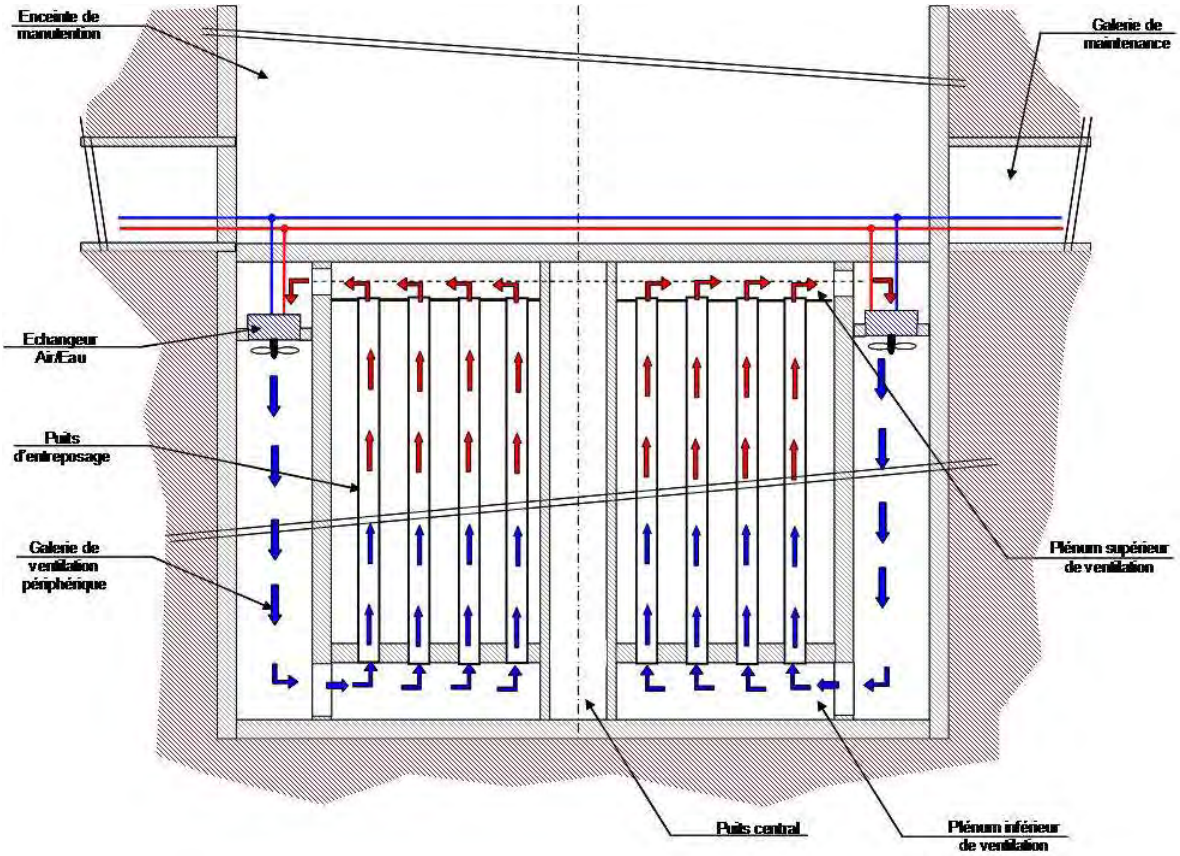


Figure 6.6-12 Circulation d'air dans la zone d'entreposage pour le refroidissement des colis

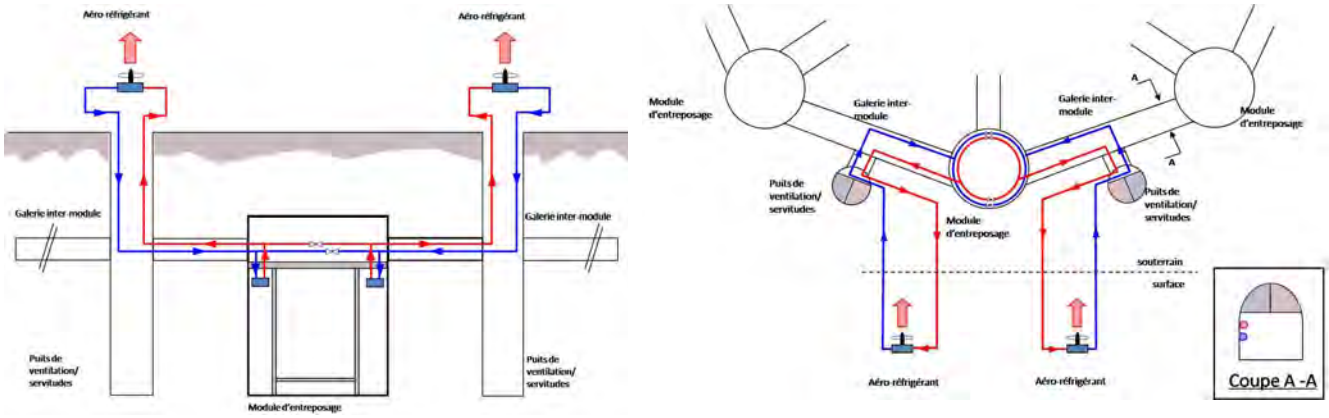


Figure 6.6-13 Réseaux d'eau de refroidissement

<u>Renouvellement de l'air de la zone d'entreposage</u>

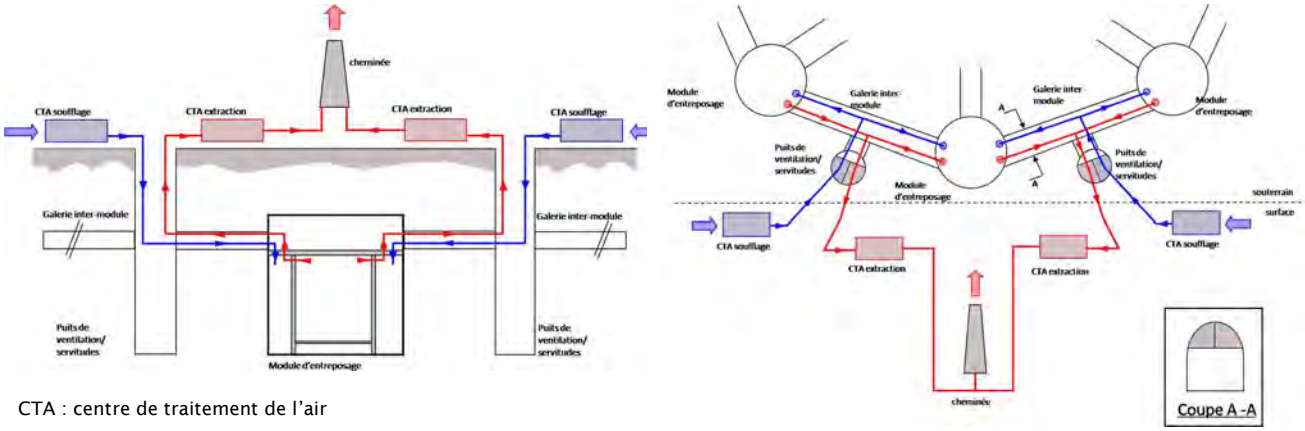
L'étude envisage un renouvellement de l'air dans la zone d'entreposage, à raison de 3 renouvellements par heure si des opérations de manutention de colis sont en cours et 0,1 renouvellement par heure sinon.

En surface, l'air prélevé à l'extérieur est filtré et déshumidifié par l'intermédiaire de batteries de chauffage[183]. Son humidité relative est ainsi ramenée à 60 % en fonctionnement normal, préservant de la corrosion les colis entreposés et les structures métalliques d'entreposage.

[183] Une récupération de la chaleur dégagée par les colis est envisageable.

Cet air est ensuite acheminé jusqu'aux modules par les puits de ventilation/servitudes et les galeries entre modules. L'air neuf est injecté en partie haute de la galerie de ventilation périphérique (Figure 6.6-14). L'extraction s'effectue en partie haute de la zone d'entreposage. L'air extrait est acheminé vers les installations de surface par les mêmes galeries et puits que le soufflage. Ces ouvrages sont ainsi compartimentés pour séparer le soufflage et l'extraction. L'air extrait peut être filtré avant rejet. Cette filtration couplée à une mise en dépression des modules par rapport aux zones de travail et aux galeries assure un confinement dynamique en complément du confinement statique assuré par les colis. La filtration permet une surveillance globale de la non-contamination de chaque module.

La conception de l'installation permet une redondance des circuits de ventilation de la zone d'entreposage, en utilisant de manière indépendante chacun des deux puits de ventilation/servitudes reliés à un même module d'entreposage.



CTA : centre de traitement de l'air

Figure 6.6-14 Renouvellement d'air de la zone d'entreposage

En cas de perte ou de dysfonctionnement des réseaux de ventilation normale ou de refroidissement par eau, il est possible de basculer la ventilation vers des galeries dédiées à cette situation d'urgence, permettant d'extraire la puissance thermique des colis. La circulation de l'air s'effectue dans ce cas par convection naturelle, sans conditionnement ni filtration de l'air pour limiter les résistances aérauliques (Figure 6.6-15). Cette situation doit être limitée dans le temps car d'une part elle n'assure plus les conditions d'hygrométrie optimales vis-à-vis de la corrosion des conteneurs et des structures, d'autre part elle réduit les possibilités de surveillance. En revanche elle permet de ne pas dépasser la température admissible au cœur des colis les plus chauds (450 °C).

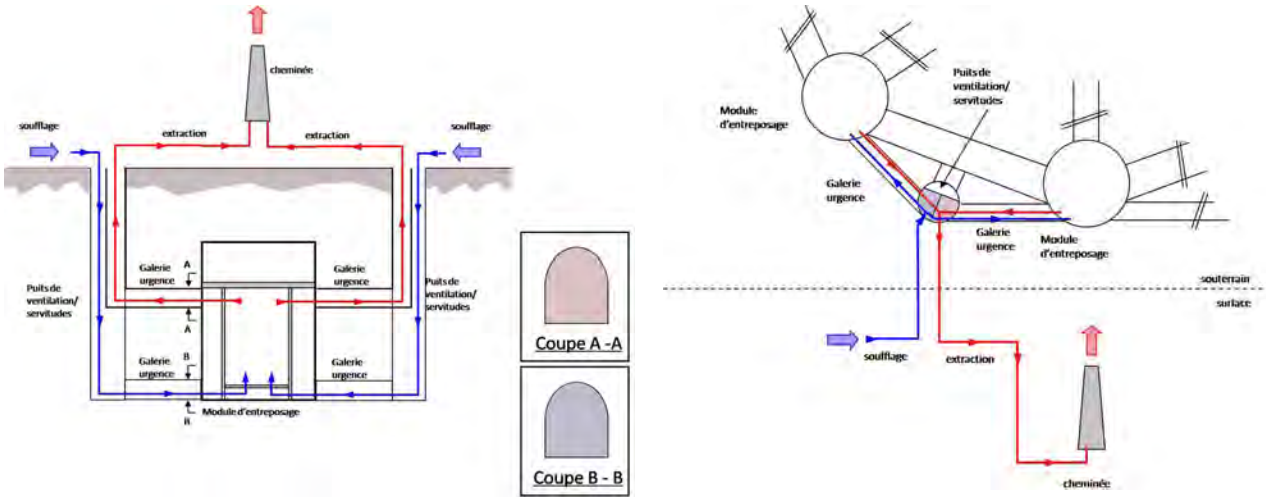


Figure 6.6-15 Ventilation d'urgence

Ventilation des zones de travail et des galeries

La Figure 6.6-16 illustre le circuit de ventilation des galeries et zones de travail accessibles au personnel d'exploitation de l'installation d'entreposage. Ce circuit utilise le troisième compartiment des puits de ventilation/servitudes et des galeries entre modules, accessible aux opérateurs.

Ici encore la connexion de chaque module d'entreposage à deux puits de ventilation/servitudes assure une redondance en cas d'incident sur l'un des deux puits.

Pendant la construction d'un nouveau module, une ventilation des travaux est mise en place de manière indépendante à la ventilation d'exploitation.

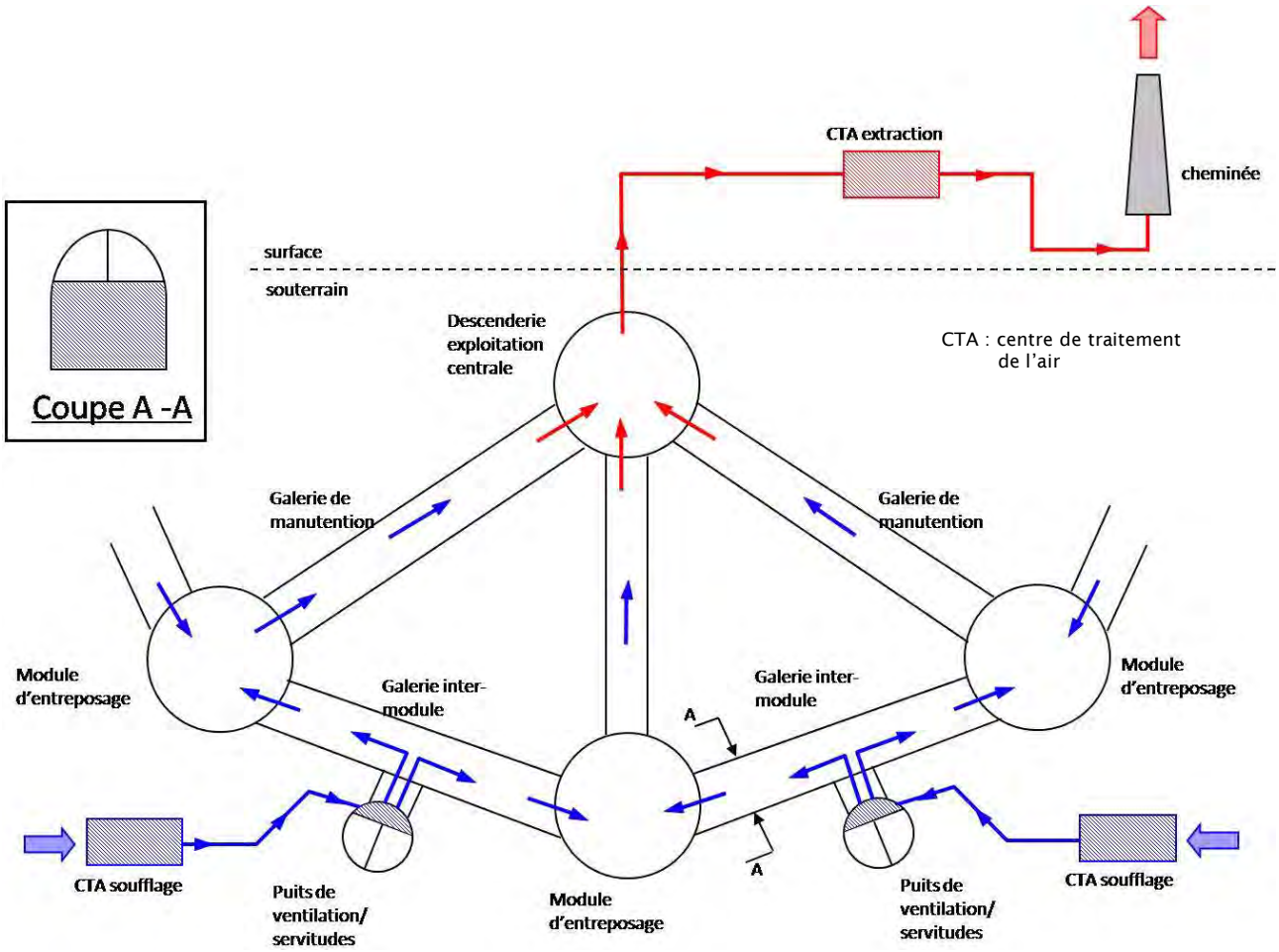


Figure 6.6-16 Ventilation des zones de travail et galeries souterraines

6.7 Etude de faisabilité d'un entrepôt en galeries souterraines

Les caractéristiques résumées de l'architecture étudiée en galeries souterraines sont :

- l'application en souterrain des principes du bâtiment multi-étagé (les colis, manutentionnés à l'unité, sont disposés verticalement en file indienne dans les galeries d'entreposage) ;
- un refroidissement par convection forcée avec soufflage par une galerie d'accès principale et extraction par des galeries secondaires.

Dans le cadre de cette étude de faisabilité, une réflexion spécifique a été menée pour l'acheminement direct des colis depuis la surface par des forages situés à proximité des galeries d'entreposage. Cette option évite (i) de doter l'infrastructure souterraine de galeries de transfert de colis, (ii) d'utiliser en souterrain un emballage blindé.

Il est à noter qu'une telle option n'est pas envisageable pour un stockage en formation géologique profonde ; elle implique en effet un grand nombre de liaisons surface-fond, situées au droit des ouvrages souterrains, ce qui serait défavorable aux fonctions de sûreté passives du stockage[184].

Le cadre retenu pour mener l'étude est une construction jusqu'à une centaine de mètres de profondeur dans une formation calcaire comparable à l'horizon K1 des calcaires du Kimméridgien de Meuse/Haute-Marne.

6.7.1 Architecture et mode de réalisation

Description des ouvrages souterrains

Dans l'architecture étudiée, un module accueillant environ 7 210 colis primaires (1 260 m^3) comporte quatre galeries d'entreposage. Chacune d'elles est implantée comme un barreau d'échelle entre une galerie d'accès principale et une galerie secondaire (Figure 6.7-1). Six colis primaires sont placés en section courante d'une galerie d'entreposage, de part et d'autre d'un couloir central facilitant l'accès à tout colis entreposé (Figure 6.7-2). Les colis sont déposés sur des râteliers les maintenant en position verticale, particulièrement en cas de séisme. La fabrication de ces râteliers à partir d'acier recyclé pourrait être étudiée.

Les galeries conçues pour accueillir indifféremment des colis primaires ou des colis de stockage disposent de râteliers spécifiques. La capacité d'entreposage d'une galerie est plus faible pour des colis de stockage que pour des colis primaires. On passe ainsi 6 colis primaires à 4 colis de stockage par rangée pour les familles F1-3-01/F1-3-02, soit une capacité de la galerie d'entreposage qui varie de 2 268 colis primaires à 1 188 colis de stockage.

Pour la manutention des colis, chaque galerie d'entreposage est desservie par un pont roulant téléopéré d'une portée de 4 m (voir infra). Elle comporte du côté de la galerie d'accès principale une zone de repli du pont roulant et une cellule de réception des colis. Dans l'option étudiée d'un transfert des colis par forages, cette cellule se situerait à la base du forage dédié à la galerie d'entreposage (Figure 6.7-3 et Figure 6.7-4).

La perméabilité des calcaires du Kimméridgien est globalement faible (10^{-8} à 10^{-9} $m.h^{-1}$). Néanmoins, cette formation présente localement quelques zones plus perméables, discontinues. Aussi, comme dans l'architecture précédente construite à ciel ouvert, le principe d'une double enveloppe a été étudié pour éviter un risque de contact entre les colis et une éventuelle venue d'eau souterraine. Cette double enveloppe serait constituée de tôles métalliques en partie supérieure et d'un plénum en béton en partie inférieure. L'eau potentiellement recueillie dans l'espace entre le revêtement en béton de la galerie et les tôles peut être dirigée par des forages vers le plénum inférieur qui présente une légère pente (0,3 %). Elle est collectée aux points bas du plénum dans des regards instrumentés qui permettent un avertissement de la présence d'eau et son pompage si nécessaire.

Deux séries de puits assurent la ventilation de refroidissement des galeries d'entreposage, l'une dédiée au soufflage de l'air et l'autre à l'extraction (voir infra). Ces puits sont compartimentés pour permettre aussi la ventilation des zones de travail (soufflage) et l'évacuation des personnes en cas d'urgence (Figure 6.7-5).

Comme dans le cas précédent d'une construction à ciel ouvert, l'architecture étudiée permet la construction de nouveaux modules pendant l'exploitation des modules antérieurs, avec une séparation physique complète de l'exploitation et des travaux par des cloisons étanches (Encadré 6.7-1). Deux descenderies indépendantes fournissent un accès depuis la surface d'une part à la partie en exploitation, d'autre part à la partie en travaux.

Des locaux de maintenance et des refuges de sécurité pour le personnel complètent l'infrastructure souterraine.

[184] Particulièrement la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau », voir le chapitre 4

Méthode de construction

Après la mise en exploitation de l'installation, une méthode d'abattage mécanique apparaîtrait plus favorable que l'utilisation d'explosifs pour le creusement de nouveaux modules (y compris les puits de ventilation/servitudes), les vibrations pouvant perturber les activités d'exploitation à proximité.

Après soutènement systématique des ouvrages creusés, par boulons d'ancrage et grillage, complétés si nécessaire par projection de béton, le revêtement final est constitué de béton projeté dans les galeries d'infrastructure et de béton coffré non armé dans les galeries d'entreposage, les puits de ventilation, la cellule de réception des colis et le poste de conduite.

Dans l'option d'un transfert des colis depuis la surface par puits forés, ces derniers sont équipés de tubes en acier inoxydable étanches calés au terrain par un coulis de ciment/bentonite. Des injections complémentaires de résine à la base des forages évitent une circulation d'eau verticale dans l'anneau de roche décomprimée autour du forage.

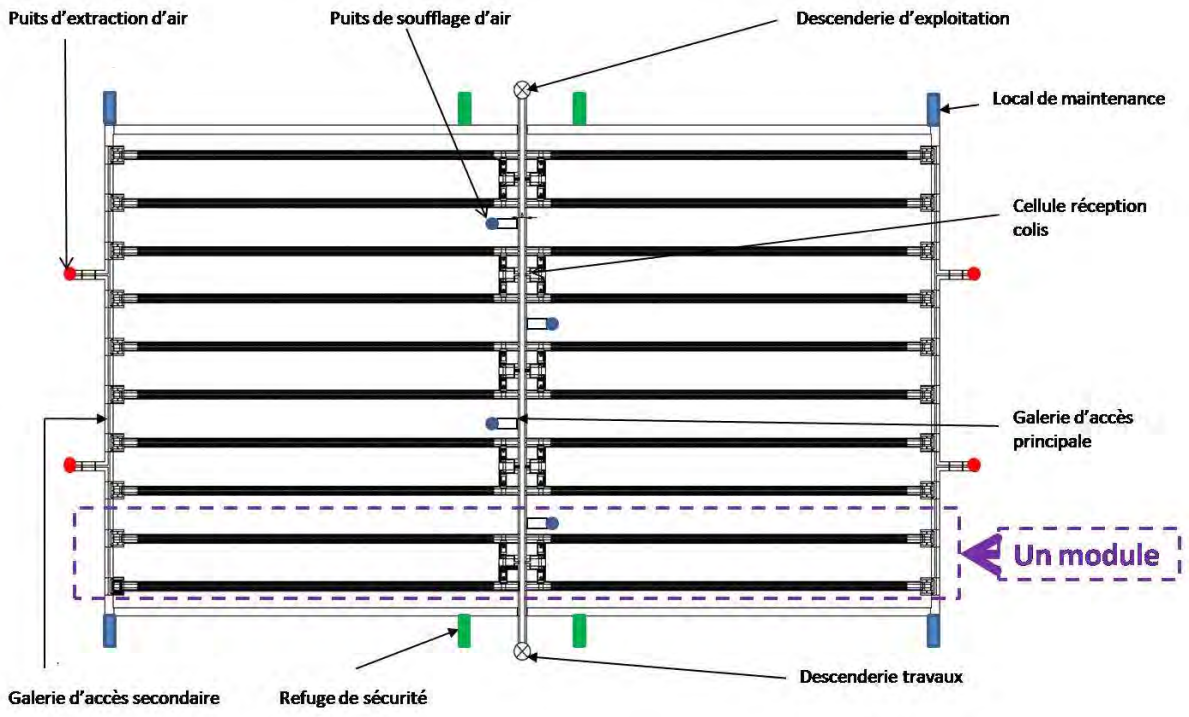


Figure 6.7-1 Architecture étudiée en galeries souterraines (vue en plan)

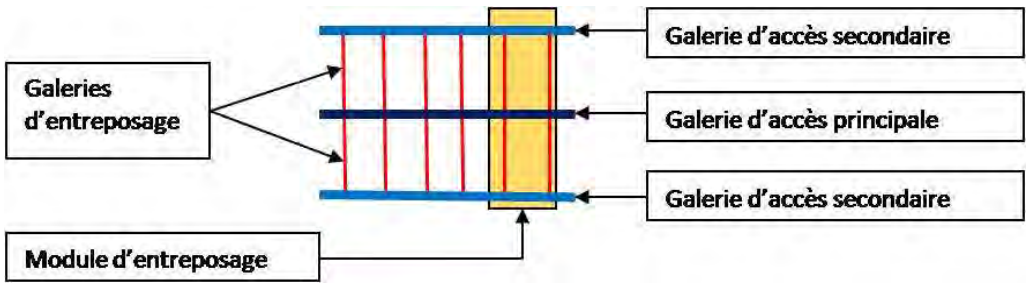


Figure 6.7-2 Vue en coupe d'une galerie d'entreposage

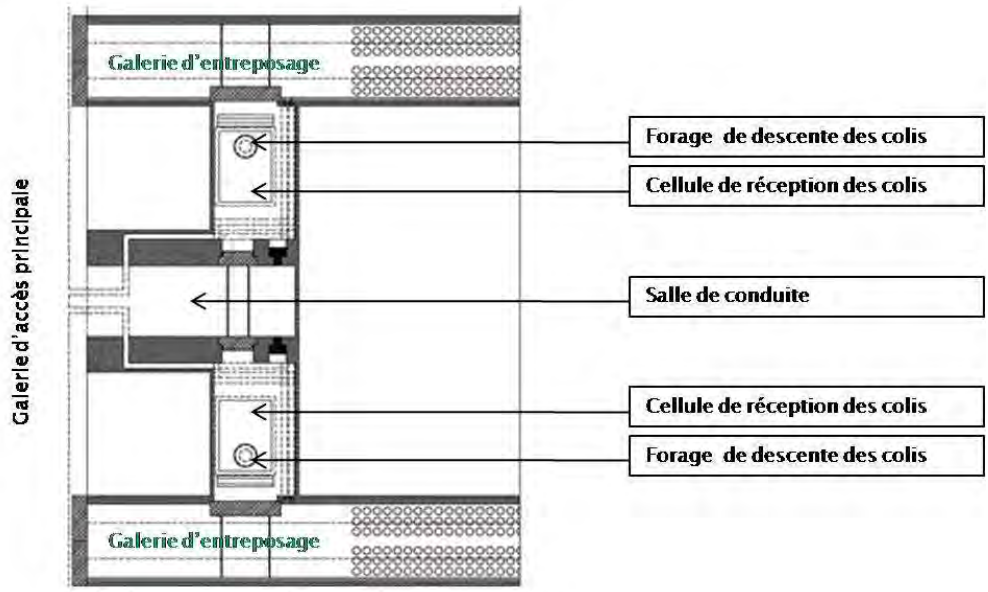


Figure 6.7-3 Schéma de la zone de réception des colis (vue en plan)

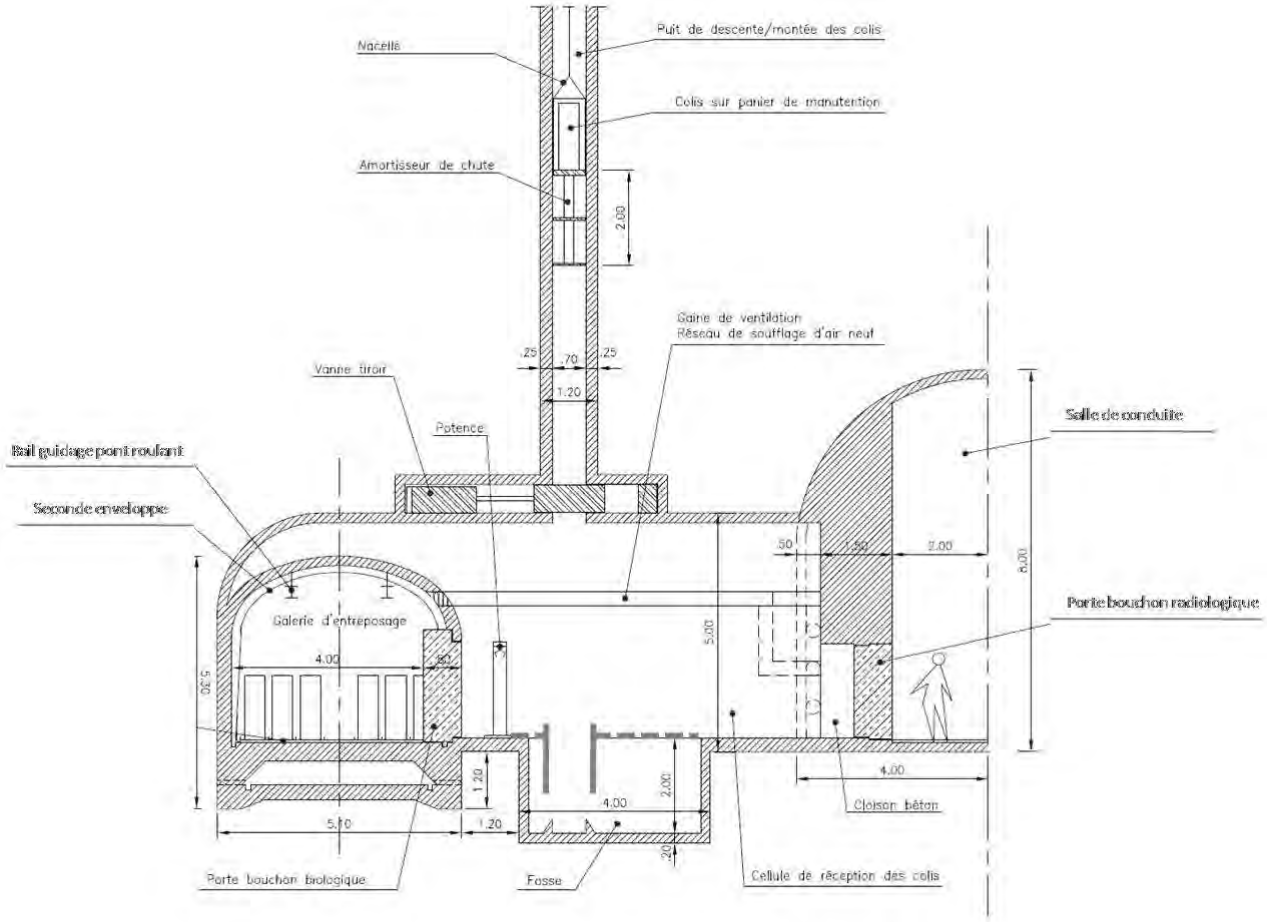


Figure 6.7-4 Vue en coupe de la galerie d'entreposage côté galerie d'accès principale

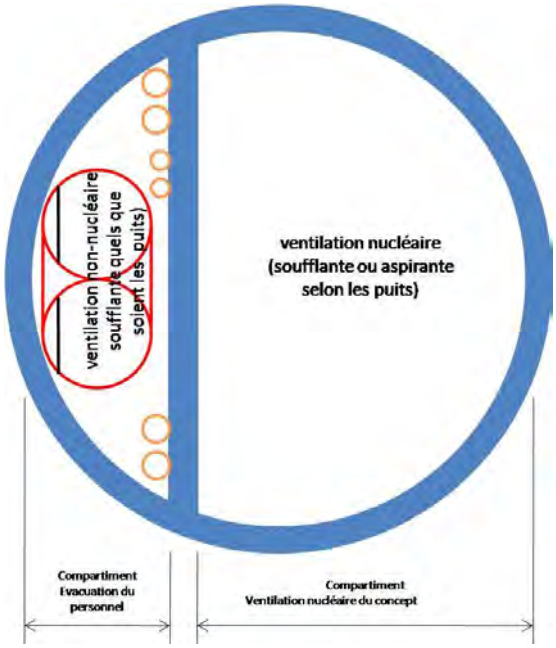


Figure 6.7-5 Coupe d'un puits de ventilation

Encadré 6.7-1 Réalisation de l'installation d'entreposage par modules successifs

Avant sa mise en exploitation, la construction de l'installation comprend tous les ouvrages de liaison nécessaires aux futures activités d'exploitation et de travaux. Une fois cette infrastructure réalisée, un premier module est construit et aménagé avant que l'on procède à la mise en place de cloisons de séparation entre la future zone exploitée et la zone en travaux. L'exploitation du premier module peut alors débuter de manière autonome par rapport aux opérations de construction du deuxième module. Après construction et aménagement du deuxième module, de nouvelles cloisons sont mises en place pour séparer la zone de travaux, qui s'est restreinte, de la zone exploitation, qui s'est agrandie. Le processus peut se poursuivre jusqu'à la totale construction des différents modules de l'installation.

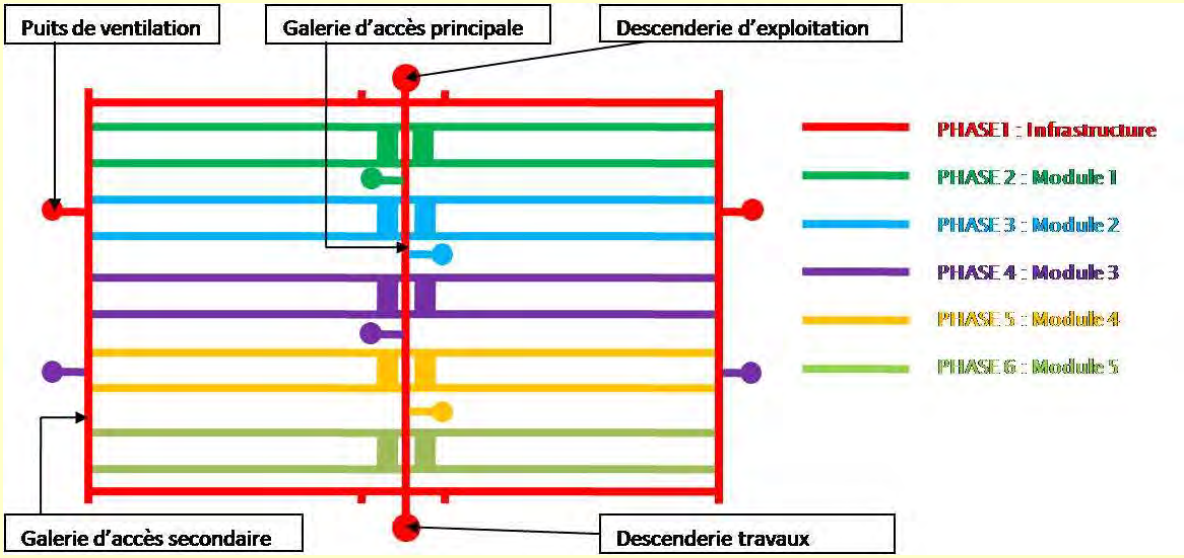


Figure 6.7-6 Phasage des travaux de construction de l'installation d'entreposage

6.7.2 Etude du transfert des colis par puits forés

Le transfert des colis dans un puits foré s'effectue au moyen d'une nacelle circulant dans ce puits, spécifique à chaque type de colis, primaire ou de stockage.

Pour descendre un colis dans une galerie d'entreposage, le colis est transporté en surface sous hotte blindée jusqu'à proximité du puits associé à cette galerie. Il est transféré de la hotte vers la nacelle dans une cellule assurant la protection radiologique, située au droit du puits. La nacelle est ensuite treuillée dans le forage jusqu'au-dessus de l'opercule situé à l'interface entre le forage et la cellule de réception des colis (vue de gauche à la Figure 6.7-7). L'opercule est alors ouvert, et la nacelle est descendue jusqu'au fond d'une fosse aménagée dans la cellule de réception des colis (vue de droite). Le colis est ensuite extrait de la nacelle par une potence (Figure 6.7-8). La remontée d'un colis s'effectue de manière inverse.

La nacelle évite que le colis ne puisse frotter contre la paroi du forage lors du transfert. Elle est suspendue au treuil de descente par plusieurs câbles via un palonnier. Elle est guidée par un méplat ou par des rainures réalisées dans le tubage du forage. Ce guidage assure une position fixe de la nacelle en fond de puits pour l'extraction du colis.

En cas de chute accidentelle de la nacelle, l'étude montre qu'il serait envisageable de réduire le risque de dissémination radioactive par un effet de pistonnement de l'air dans le puits qui limiterait fortement la vitesse de chute (Encadré 6.7 2) et par un amortisseur placé sous la nacelle (Encadré 6.7-3).

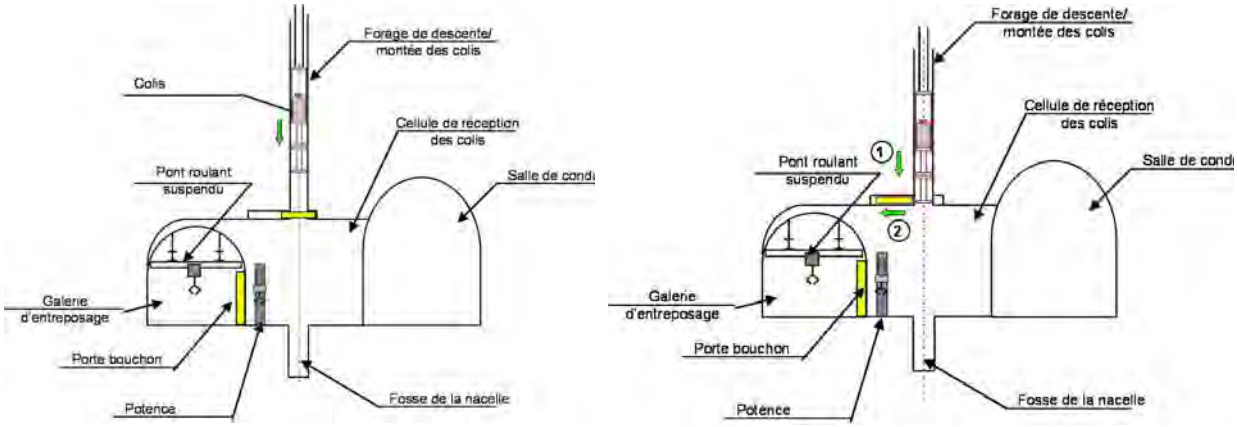


Figure 6.7-7 Transfert d'un colis à l'aide d'une nacelle circulant dans le puits foré

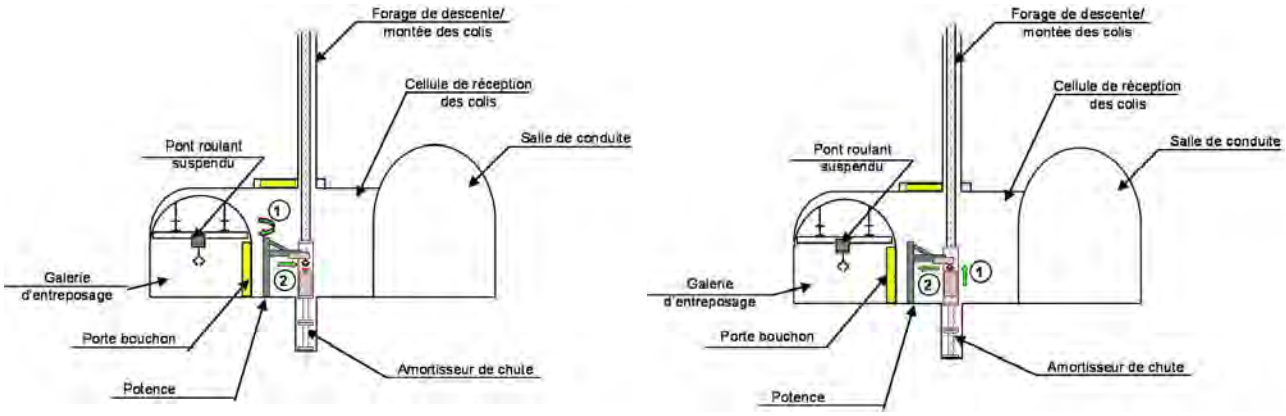


Figure 6.7-8 Extraction du colis de la nacelle de transfert

Encadré 6.7-2 Ralentissement de la nacelle en cas de chute par effet de pistonnement

L'effet de pistonnement repose sur (i) une étanchéité du puits pendant le transfert, au moyen de l'opercule disposé à sa partie inférieure, (ii) le faible jeu entre la paroi du puits et la nacelle (24 mm sur le diamètre dans les calculs effectués).

La descente de la nacelle pistonne l'air dans le puits en provoquant une perte de charge importante. En cas de chute, cette perte de charge génèrerait un freinage. Le tableau ci-dessous montre l'équivalence des hauteurs de chutes calculées avec l'effet du pistonnement : dans le cas d'un colis primaire, la hauteur de chute équivalente serait inférieure à 1,50 m ; dans le cas d'un colis de stockage, elle resterait inférieure à 3 m.

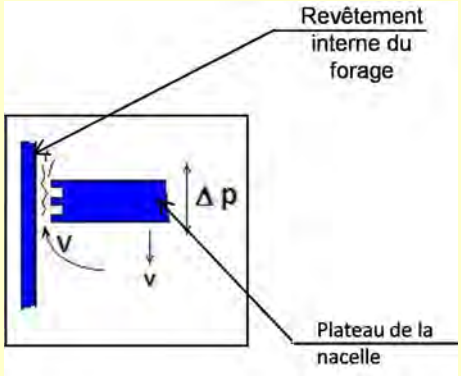


Figure 6.7-9 Freinage par pistonnement

Tableau 6.7-1 Hauteurs de chutes équivalentes

Hauteur de chute réelle (m)	Hauteur de chute équivalente (m) Colis de 2 tonnes	Hauteur de chute équivalente (m) Colis de 0,5 tonnes
55	2.64	1.14
50	2.60	1.14
40	2.22	1.16
30	1.69	1.13
20	1.80	1.16
10	2.77	1.10
7.5	2.83	1.11
5	2.58	1.19
2.5	1.75	1.13

Encadré 6.7-3 Amortisseur de chute

L'amortisseur de chute fixé en partie inférieure de la nacelle est constitué d'une colonne écrasable entre deux brides pleines. Son but est d'absorber l'énergie cinétique et potentielle qui pourrait être libérée lors de la chute libre d'un panier contenant un colis.

L'amortisseur intervient de façon complémentaire au freinage par pistonnement, qu'il contribue à générer par la forme de ses brides.

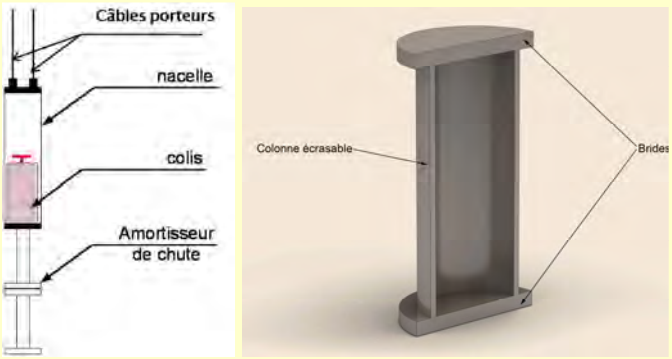


Figure 6.7-10 Amortisseur de chute sous la nacelle

6.7.3 Manutention des colis de déchets en souterrain

Une fois le colis de déchets extrait de la nacelle, la porte blindée séparant la cellule de réception des colis et la galerie d'entreposage est ouverte, et la potence[185] de la cellule dépose le colis à l'entrée de la galerie d'entreposage (Figure 6.7-11). Le colis est alors repris par le pont roulant de la galerie[186] et acheminé jusqu'à son emplacement d'entreposage où il est déposé dans le râtelier. Les mêmes opérations, réalisées dans le sens inverse, permettent le retrait du colis.

La potence et le pont roulant sont chacun équipés d'un grappin interchangeable, adapté au type de colis à déplacer. En cas de perte de l'alimentation électrique le grappin de préhension des colis reste fermé.

Les déplacements de colis par la potence s'effectuent à une hauteur de 15 centimètres, ceux assurés par le pont roulant à une hauteur maximale de 30 centimètres. Les conséquences éventuelles d'une chute sont ainsi minimisées.

Tous les moteurs assurant les déplacements de la potence et du pont roulant sont redondés afin d'assurer à tout moment la repose du colis dans une situation stable et sûre.

En cas d'immobilisation du pont, par blocage des roulements par exemple, un « pont lièvre » est utilisé pour le ramener à l'extrémité de la galerie d'entreposage pour intervention. Si besoin, le pont roulant peut être évacué hors de la galerie.

Un transbordeur, qui circule sur rail dans les galeries d'accès secondaire, assure les déplacements de la potence et du pont roulant d'une galerie d'entreposage à l'autre, ou vers une zone de maintenance. Il permet aussi d'amener les équipements d'intervention, en particulier le pont lièvre.

L'architecture étudiée favorise l'accès aux colis pour une surveillance individuelle. Grâce au couloir central des galeries d'entreposage équipé de râteliers libres (Figure 6.7-12), le retrait d'un colis quelconque nécessite de manœuvrer au plus deux colis en plus du colis cible (Figure 6.7-13).

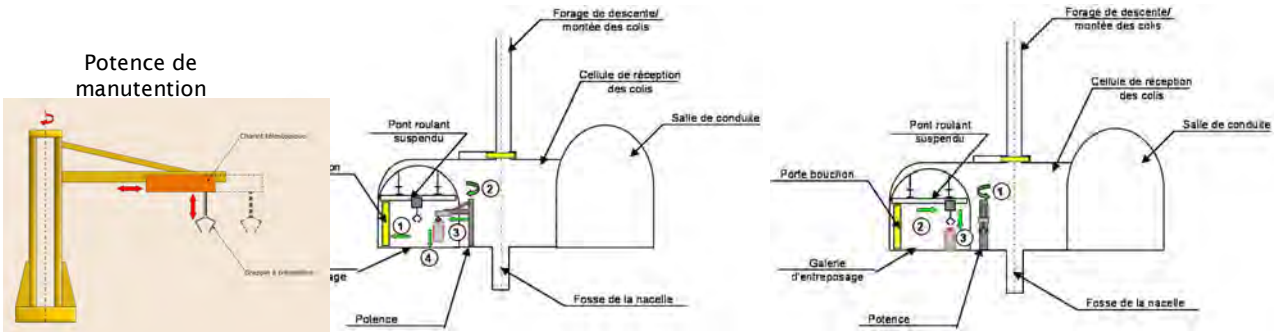


Figure 6.7-11 Introduction du colis dans la galerie d'entreposage (à gauche) et prise en charge par le pont roulant (à droite)

[185] La potence permet un mouvement de translation pour extraire le colis de la nacelle de descente, et un mouvement de rotation qui permet d'acheminer le colis à l'entrée de la galerie d'entreposage.

[186] En dehors des périodes de manutention de colis, le pont roulant est entreposé en attente à l'écart d'une irradiation directe par les colis.

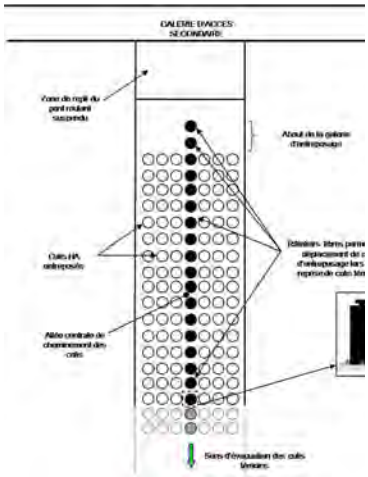


Figure 6.7-12 Position des râteliers libres dans la galerie d'entreposage

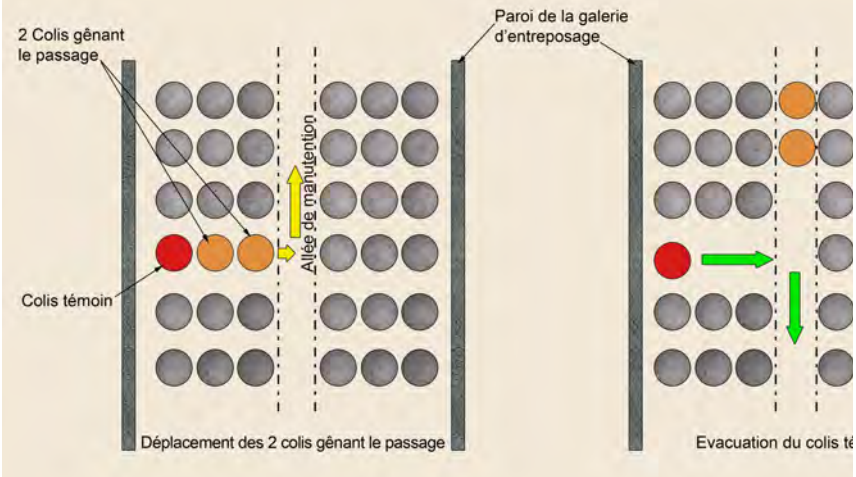


Figure 6.7-13 Illustration du retrait d'un colis dans le cadre de la surveillance

6.7.4 Ventilation

L'ensemble des réseaux de ventilation fonctionne en circuit ouvert par convection forcée. C'est le flux d'air atmosphérique qui sert au refroidissement des colis.

<u>Ventilation de refroidissement des colis</u>

En surface, à l'entrée du réseau de soufflage de refroidissement, l'air est filtré et déshumidifié (par l'intermédiaire de batteries de chauffage). Son humidité relative est ainsi ramenée à 60 % en fonctionnement normal. Cet air est ensuite acheminé au niveau des modules par les puits de ventilation/servitudes et le plénum supérieur de la galerie d'accès principale. Il est introduit dans les galeries d'entreposage qu'il balaye en pleine section (Figure 6.7-14).

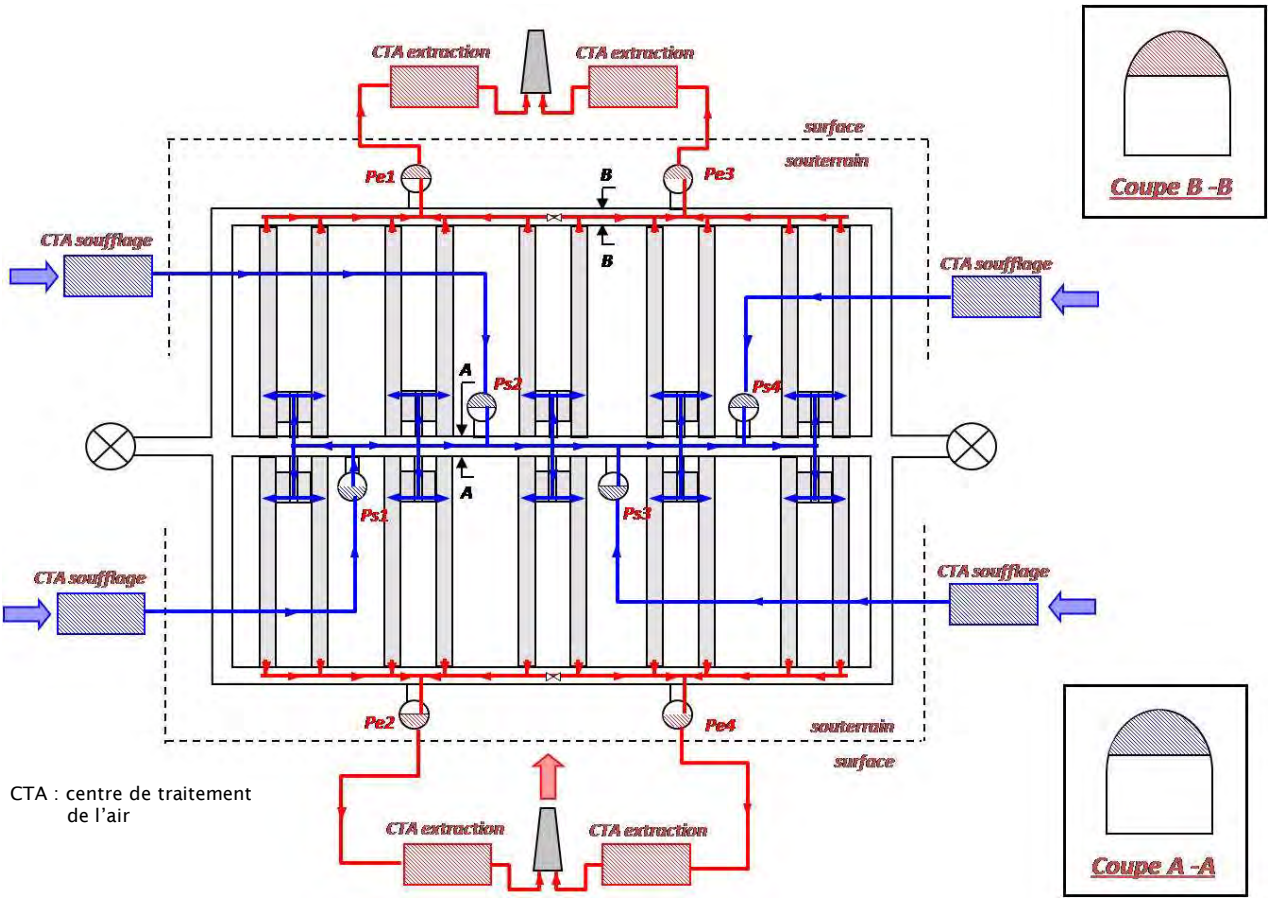
L'air chaud est extrait à l'extrémité opposée de la galerie d'entreposage où il est collecté par le plénum supérieur de la galerie d'accès secondaire, qui l'achemine jusqu'au puits d'extraction. Il peut être filtré et contrôlé avant rejet dans l'atmosphère.

La filtration de l'air extrait permet une surveillance globale des modules d'entreposage. Associée à une mise en dépression des galeries d'entreposage, elle en assure un confinement dynamique. Pour obtenir la consigne de dépression, le principe de fonctionnement consiste à extraire à débit constant (par asservissement des ventilateurs d'extraction à un débitmètre situé en aval des caissons-filtres du dernier niveau de filtration) et à réguler les débits de soufflage sur ceux d'extraction.

Avec une hypothèse de 2 268 colis de la famille F1-3-01 par galerie d'entreposage et d'une puissance thermique de 500 W par colis, le débit global maximal de chaque puits de soufflage est de 720 000 $m^3.h^{-1}$ et celui de chaque puits d'extraction de l'ordre de 780 000 $m^3.h^{-1}$. La température au cœur du verre s'établit à 450 °C et la température du béton ne dépasse pas 70 °C.

La puissance électrique nécessaire à la ventilation de refroidissement dépend fortement de la température extérieure. Ainsi, pour l'ensemble des 36 040 colis HA pris pour hypothèse d'étude, la puissance consommée par les ventilateurs serait de 1 800 kW pour une température extérieure de 45 °C et de 945 kW pour une température extérieure de 35 °C.

Pour accepter des colis de puissance thermique sensiblement supérieure à 500 W, il faudrait diminuer le nombre de colis entreposés dans chaque galerie d'entreposage, en maintenant le même débit d'air. Cela conduirait à une densité d'entreposage particulièrement faible, très défavorable au plan technico-économique.



CTA : centre de traitement de l'air

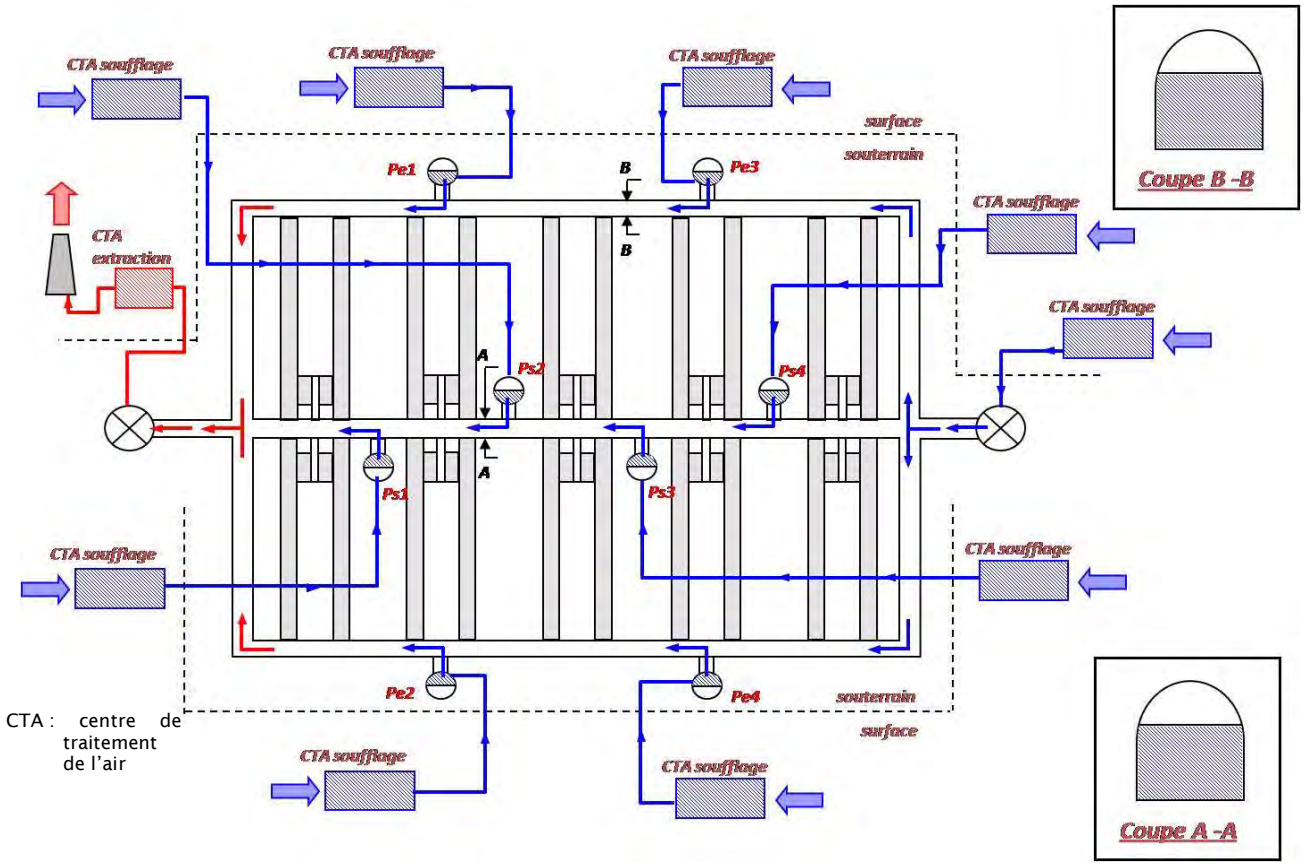
Figure 6.7-14 Schéma de principe de la ventilation des galeries d'entreposage

Ventilation des zones de travail et des galeries d'accès

Comme dans le cas d'une construction à ciel ouvert, les zones de travail et galeries d'accès sont ventilées séparément des galeries d'entreposage. L'air prélevé à l'extérieur et conditionné est injecté dans tous les puits de ventilation/servitudes dans le compartiment réservé à l'accès du personnel. Cette disposition favorable à la sécurité place en entrée d'air toutes les zones de puits accessibles au personnel qui serviront au besoin pour l'évacuation d'urgence. L'air est ensuite soufflé dans les galeries d'accès principale et secondaires, puis extrait vers la surface par la descenderie d'exploitation (Figure 6.7-15).

Ventilation des parties en travaux

Lors de la construction d'un nouveau module d'entreposage, la zone en travaux fait l'objet d'une ventilation indépendante, séparée de l'exploitation par des barrages étanches.



CTA : centre de traitement de l'air

Figure 6.7-15 Schéma de principe de la ventilation des zones de travail et des galeries d'accès

6.8 Bilan des études 2007-2009, introduction des études effectuées à partir de 2011

6.8.1 L'évaluation des concepts issus des études de faisabilité (2009)

A l'issue des études de faisabilité présentées ci-avant, les différents concepts étudiés ont fait l'objet en 2009 d'une évaluation comparative afin de dégager ceux qui offriraient les meilleures potentialités pour la suite des études et recherches. Afin de situer les performances de ces concepts novateurs par rapport aux entrepôts industriels existants, ces concepts ont aussi été comparés aux entrepôts de R7 et T7 ainsi qu'à E-EV-SE (La Hague, voir le chapitre 3).

Le Tableau 6.8-1 synthétise cette évaluation, effectuée sur la base des critères suivants :

- la robustesse des fonctions de sûreté : radioprotection, prévention des risques internes, défense contre les agressions externes ;
- l'accessibilité aux colis pour les examiner en place ou les prélever dans le cadre de la surveillance ;
- la polyvalence vis-à-vis des caractéristiques dimensionnelles, thermiques ou radioactives des colis ;
- l'aptitude à la durabilité : régulation des conditions atmosphériques, facilité de surveillance et de maintenance de l'installation ;
- la modularité : adaptabilité des options aux besoins en capacité, possibilité d'une création par tranches successives.

Ces critères d'évaluation s'attachent aux potentialités globales de chaque concept. En effet, la performance d'une architecture d'entreposage dépend non seulement des principes techniques qu'elle adopte, mais aussi du dimensionnement de ses composants, qui n'est pas détaillé au niveau d'une étude de faisabilité.

Par exemple, la prolongation possible de la durée d'exploitation dépendra de l'épaisseur d'enrobage des armatures du béton armé et de la formulation de ce béton, qui déterminent en grande partie la durabilité de la structure.

Dans certains cas, la performance d'une architecture peut aussi dépendre de l'adjonction ou non de composants secondaires : par exemple la présence d'un filtre électrostatique en entrée d'une ventilation permet de piéger les poussières et les polluants, contribuant ainsi à protéger la structure de l'entreposage et les colis. Cependant la mise en place d'un tel dispositif dépend peu de l'option de base de l'architecture.

En matière de durabilité et de la facilité de maintenance, il n'est pas apparu d'architecture novatrice qui offrirait une potentialité supérieure à celles déjà mises en œuvre industriellement. Le renforcement de la durabilité passe par des dispositions constructives : choix des matériaux, dimensionnement (voir le chapitre 8) ou de composants spécifiques, plutôt que par un changement d'option d'architecture.

En revanche des options de conception innovantes ont été mises en exergue qui permettraient, lorsque cela est pertinent, d'accroître la polyvalence des entrepôts et l'aptitude à la surveillance par rapport aux pratiques actuelles. Des solutions particulièrement modulaires sont aussi identifiées.

Tableau 6.8-1 Evaluation des options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets HA existantes et novatrices (2009)

	Puissance thermique maximale	Robustesse des fonctions de sûreté	Accessibilité des colis	Polyvalence	Aptitude à la durabilité	Modularité
Installations existantes						
R7 – T7 Fosses d'entreposage des ateliers de vitrification	2 000 W	++	+	++	+++	++
E-EV-SE Extension de l'entreposage des verres Sud Est	2 000 W	+++	+	++	+++	+++
Etudes de faisabilité présentées au chapitre 6						
Entreposage en surface						
Architecture en puits verticaux avec regroupement des colis	1 000 W	+++	++	++++	+++	+++
Bâtiment multi-étagé	500 W	++	+++	++	+++	++
Casemates modulaires en béton sur radier (®NUHOMS)	1 500 W	+++	+	+++	+++	++++
Entreposage à faible profondeur						
Entrepôt en puits verticaux construit à ciel ouvert, colis unitaires	2 000 W	+++	+	++	+++	++
Entrepôt en galeries souterraines	500 W	+++	+++	++	++	++

Implantation en surface ou à faible profondeur ?

D'une manière générale la réalisation d'installations d'entreposage à faible profondeur comprend une plus grande part d'aléas (en liaison avec la nature du terrain). Même si une réalisation souterraine peut en principe diminuer les volumes de béton à mettre en œuvre pour assurer la protection des personnes vis-à-vis du rayonnement et celle des colis vis-à-vis d'agressions externes, son coût n'est en général pas moindre qu'en surface.

Les études réalisées montrent qu'une implantation à faible profondeur génère deux contraintes spécifiques : (i) la nécessité de créer un réseau d'accès de longueur importante en souterrain jusqu'aux modules d'entreposage, (ii) une moindre flexibilité vis-à-vis d'évolutions de capacité.

Les circuits de refroidissement par convection sont ainsi plus longs et les résistances aérauliques plus élevées. Un refroidissement qui reposerait uniquement sur la convection naturelle apparaît difficile à mettre en place à faible profondeur, sauf éventuellement dans le cas où une topographie particulière du site le permettrait.

Des dispositions doivent être prises pour protéger l'entrepôt de l'eau souterraine. En surface, cela génère des contraintes sur le radier ; à faible profondeur, cela concerne l'ensemble des ouvrages.

Des solutions peuvent consister en un rabattement de nappe autour de l'installation si cette dernière se trouve à très faible profondeur, comme cela est pratiqué à La Hague dans le cas de E-EV-SE, ou par l'adoption d'une double enveloppe telle que proposée dans les études de faisabilité. Une double enveloppe nécessite d'assurer la protection contre l'exposition externe des opérateurs chargés du contrôle, et donc de renforcer l'épaisseur des voiles latéraux en béton du module d'entreposage, ou de développer des moyens de contrôle robotisés.

Une autre option pour la protéger de l'eau souterraine consisterait à placer l'installation dans une formation très peu perméable, comme dans le cas du stockage, ce qui supposerait de disposer d'un tel contexte géologique à faible profondeur sur les sites envisageables pour l'entreposage.

Au plan de la durabilité, une implantation à faible profondeur présente l'avantage de tamponner les variations de certaines sollicitations externes, mais ne permet pas l'accessibilité à l'extrados des ouvrages en contact avec la roche. Par ailleurs, il est possible d'adapter la conception d'installations en surface pour amortir les sollicitations externes. Au final, une implantation souterraine n'apparait pas plus favorable à une durabilité séculaire.

Du point du vue de la robustesse, la possibilité pour des ouvrages souterrains d'offrir une grande résistance à une agression externe (chute d'avion en particulier) ne compense pas nécessairement un fonctionnement moins passif et une plus grande complexité des systèmes de refroidissement. De plus, il est possible d'assurer une protection efficace vis-à-vis du risque de chute d'avion au moyen du génie civil d'un entrepôt en surface. Cela peut être illustré par l'expérience allemande présentée au chapitre 3, où la majorité des entrepôts renforcés vis-à-vis des agressions externes adoptent une implantation en surface.

Aussi, à l'issue des études de faisabilité présentées en 2009, il n'est pas apparu pertinent de poursuivre l'investigation d'options de conception en galeries souterraines pour l'entreposage des colis de déchet HA.

L'option d'une construction à faible profondeur à ciel ouvert, enterrée en tout ou partie, est susceptible d'apporter des bénéfices particuliers. D'une part elle ouvre des possibilités supplémentaires d'intégration au paysage, selon le site d'implantation. D'autre part, dans les architectures verticales en puits, elle permet d'optimiser la hauteur de ces puits, diminuant l'emprise de l'installation.

Ces bénéfices, qui ont d'ores et déjà conduit à adopter une architecture semi-enterrée pour E-EV-SE, doivent néanmoins être mis en regard de la gestion de l'eau souterraine, voire d'une plus grande complexité de la ventilation selon la profondeur envisagée.

Les trois concepts d'entreposage HA en surface ou légèrement enterrés, qui ont fait l'objet d'une étude de faisabilité au stade de l'esquisse ont donc été conservés pour la seconde phase des études et recherches. Les deux concepts à faible profondeur ont été écartés.

6.8.2 Les principales caractéristiques des trois concepts retenus pour la deuxième phase

Le concept « HA1 » reprend l'architecture verticale en puits aujourd'hui mise en œuvre industriellement avec un système de ventilation passif qui permet d'évacuer les puissances thermiques les plus élevées.

Le placement des colis de déchets en casiers introduit une polyvalence, qui permettrait à l'installation d'offrir un soutien à la réversibilité. En contrepartie la puissance thermique admissible est limitée. Au stade des études de faisabilité une limite d'environ 1 kW par colis a été identifiée.

Ce concept compact est adapté à une implantation sur un site industriel existant. Il permet de créer de grandes capacités d'entreposage de colis primaires sur de longues durées pour une décroissance radioactive poussée.

Le concept « HA2 » est basé sur une structure multi-étages reprise de l'installation ECC à La Hague. Les colis de déchets déposés en position verticale sur des planchers sont refroidis par ventilation mécanique horizontale.

Ce concept offre en principe une grande polyvalence vis-à-vis des caractéristiques dimensionnelles des colis, notamment pour une reconfiguration de l'entrepôt entre des colis primaires et des colis de stockage. Il permet une bonne accessibilité aux colis et facilite donc leur surveillance.

Il est également modulaire, adaptable à la fois à :

- de petites capacités correspondant à la fonction de tampon sur le site de Cigéo, qui pourrait être mutualisée avec des colis de déchets MAVL.[187],
- de plus grandes capacités pour des colis de déchets qui auraient été retirés du stockage, sachant que ces colis présenteraient une puissance thermique résiduelle compatible avec ce concept aux possibilités limitées en matière d'évacuation de la chaleur.

Ce concept est en revanche peu adapté à des entreposages de longue durée pour une décroissance radioactive poussée ou une mise en attente prolongée.

Le concept « HA3 » en casemates modulaires en béton sur radier dérivé du concept ®NUHOMS d'entreposage sur le site des centrales nucléaires des combustibles usés bénéficie lui aussi d'un important retour d'expérience industriel.

Le concept est passif, polyvalent et d'une très grande modularité. Dans son principe il devrait permettre l'enchaînement de l'entreposage et d'un transport sur route ou sur rail sans extraire les colis primaires ou de stockage de leur « canister » qui constitue une barrière de confinement. Cependant cette possibilité n'avait pas été suffisamment démontrée par les études de faisabilité de la première phase.

Le concept HA3 peut être rapidement déployé sur un site disposant d'une emprise foncière suffisante. Il permettrait notamment de faire face à une situation de récupération de colis stockés.

[187] Du fait de la capacité réduite, la puissance thermique totale à évacuer est suffisamment faible pour envisager cette architecture relativement peu efficace à évacuer la chaleur, mais qui offre des avantages en matière de polyvalence et de souplesse d'exploitation.

Il apporterait ainsi un soutien souple à la réversibilité du stockage : il préserverait la possibilité de conserver les colis sous forme de colis de stockage ou de colis primaires et de les transférer rapidement sur un autre site ou au contraire de les mettre en attente sur place.

Le concept limite l'accessibilité aux colis pour une surveillance individuelle. Il n'est donc pas le plus adapté pour un entreposage de décroissance thermique et encore moins pour une fonction de tampon.

6.8.3 Axes d'optimisation des trois concepts explorés dans le cadre de la seconde phase, données d'entrée

La seconde phase d'études s'est attachée à rechercher les optimisations possibles des concepts HA1 à HA3.

Pour les concepts HA1 et HA2 le principal axe d'optimisation porte sur la robustesse de fonctionnement face à des agressions extérieures et intérieures. Secondairement des simplifications dans le système de manutention amenant une plus grande facilité de maintenance sont visées ainsi qu'une amélioration des performances du système de refroidissement pour pouvoir accepter des colis ayant une puissance thermique supérieure.

Pour le concept HA3 le principal axe d'optimisation porte sur l'articulation de l'entreposage et du transport par la mise en commun de certains composants et du système de chargement. Même si le concept HA3 a été initialement étudié pour des colis de puissance thermique unitaire de 1 500 watts, les études d'optimisation se focalisent sur une puissance thermique inférieure ou égale à 500 watts, compte tenu de l'application privilégiée de ce concept à la réversibilité.

Pour chacun des trois concepts précédents, les hypothèses en matière de nombres et de capacités des modules d'entreposage, de flux d'entrée / sortie et de puissance thermique maximale des colis à l'admission qui ont été prises en compte dans les études d'optimisation sont données au tableau suivant. Celui-ci précise les types d'entreposage qui pourraient être réalisés suivant chaque concept, leur durée maximale d'exploitation et les types de sites sur lesquels ils pourraient être implantés : site littoral à climat océanique, site continental à climat tempéré froid ou méditerranéen avec une séismicité couvrant les échelles rencontrées en France métropolitaine.

Tableau 6-8-2 : Hypothèses retenues pour les études d'optimisation de chacun des trois concepts d'entreposage de colis HA

Concepts d'entreposage	Concept 1 E-EV-SE	Concept 2 ECC		Concept 3 NUHOMS
Flux d'entrée/sortie en m3 par an (Nb de colis par an)	140 (800)			
Capacité d'un module en m3 (Nb de colis type CSD-V)	700 (4 000)	700 (4 000)	52 (300)	5 alvéoles : 21m3 (120)
Nombre maximal de modules	6	6	80	200
Puissance thermique maxi par colis (watt)	1 500	500	500	500
Puissance thermique mini en sortie (watt)	200			
Type d'entreposage Tampon : T ; décroissance : D ; attente : A ; récupération : R	D A R	D A R	CIGEO T D A R	D A R
Durée d'exploitation (en années)	100			
Type de site d'implantation	1	1	1 et 2	1 et 3

Typologie des conditions de sites situés en France métropolitaine :
- Type 1 : site littoral océanique à séismicité moyenne
- Type 2 : site continental, à climat froid et séismicité faible
- Type 3 : site continental, à climat méditerranéen et à séismicité forte

6.9 Les évolutions possibles du concept HA1 dans une optique d'optimisation (entreposage en puits verticaux et regroupement des colis en casiers)

6.9.1 L'empilement des colis et le refroidissement en puits

Pour mémoire les colis disposés dans des casiers sont empilés et l'air de ventilation qui est introduit dans le plénum inférieur à partir des prises d'air monte par thermo-siphonage à l'intérieur d'une double enveloppe entourant chaque puits vers le plénum supérieur et la cheminée. L'évacuation de la puissance thermique des colis vers l'extérieur des puits est effectuée par conduction.

Les études d'optimisation ont exploré des évolutions significatives du concept par rapport aux dispositions présentées à la section 6.3.

Une première évolution consiste en des casiers formant des structures pleines en alliage d'aluminium, offrant une conductivité thermique élevée pour favoriser la dissipation de la chaleur (230 $W.m^{-1}.K^{-1}$). Dans ces casiers sont ménagées des cavités cylindriques dont le diamètre et la hauteur, au jeu de manutention près, sont égaux à ceux des colis primaires. Si un retrait de colis de stockage hors de Cigéo était décidé, des casiers adaptés à leurs dimensions seraient fabriquées avec un diamètre extérieur égal à celui des casiers précédents. Les colis de stockage seraient entreposés à raison de trois par casier.

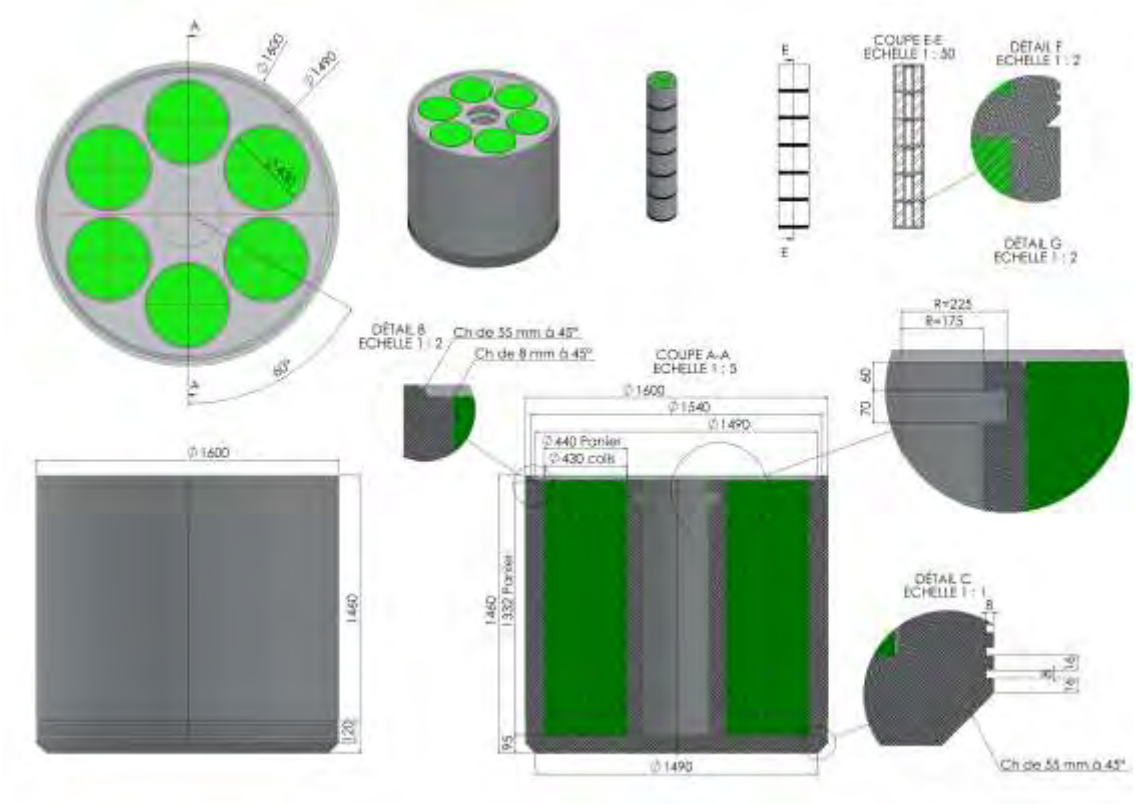


Figure 6.9-1 Casiers massifs en alliage d'aluminium pour 6 colis HA de déchets vitrifiés assurant l'évacuation de la chaleur par diffusion

La rectitude de l'empilement qui est réalisé sur 6 niveaux est assurée par un centrage sur le chanfrein conique disposé en partie inférieure du casier et qui vient s'engager dans un chanfrein périphérique placé en partie supérieure du casier placé en dessous. En cas de séisme l'empilement reste stable et ne vient pas heurter les parois du puits.

Les casiers présentent un grande résistance mécanique et protègent les colis en cas de chute. La manutension du casier est effectuée par un outil central de préhension qui vient s'encliquer dans une gorge usinée dans l'alésage central du casier.

Les puits d'entreposage y compris les vides internes des casiers sont remplis d'hélium et sont fermés hermétiquement après le placement des casiers. Ils constituent une barrière de confinement.

Cette évolution par rapport à la section 6.3 offre trois avantages :

- l'atmosphère au contact des colis est sèche et non corrosive pour les conteneurs ;
- les phénomènes de radiolyse qui dans l'air atmosphérique peuvent produire des radicaux chimiquement actifs comme les oxydes d'azote, le peroxyde d'hydrogène ou l'ozone sont supprimés ;
- la diffusion de la puissance thermique à travers les jeux fonctionnel autour des colis primaires et autour des casiers est augmentée car la conductivité thermique de l'hélium est environ 6 pois supérieure à celle de l'air (voir le tableau suivant).

Cela permet de supprimer le balayage des puits d'entreposage par une ventilation nucléaire à faible débit.

Lors de l'ouverture du puits pour chargement ou déchargement des casiers l'hélium s'échappe dans le hall et est évacué par sa ventilation. Une ventilation provisoire peut alors créer une dépression dans le puits afin d'éviter une éventuelle contamination en cas de chute. L'air du hall de manutention est aspiré suivant un débit suffisant pour compenser par convection, la réduction de la quantité de chaleur évacuée par diffusion dans l'hélium.

Après fermeture du puits d'entreposage, la ventilation provisoire évacue l'air résiduel qui est remplacé à nouveau par de l'hélium admis en partie haute.

L'ensemble de ces modifications devrait permettre si nécessaire de porter la puissance thermique maximale acceptable en entreposage à 1 500 watts par colis CSD-V.

Tableau 6.9-1 Conductivités thermiques de différents gaz pouvant être utilisés pour le remplissage des puits d'entreposage

Gaz	Conductivité thermique vers 20 °C (mW.m-1.K-1)
Air	26
Azote	26
Hélium	152
Néon	49
Argon	18

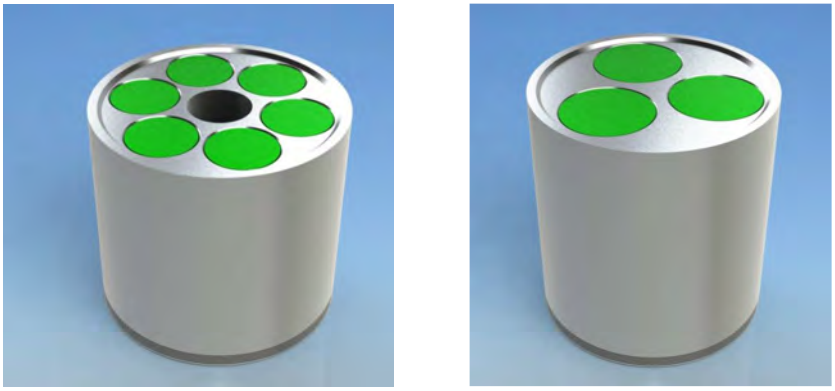


Figure 6.9-2 Casiers massifs en alliage d'aluminium pour l'empilement en puits de 6 colis primaires d'une puissance thermique maximale de 1 500 watts ou de 3 colis de stockage du concept HA1 d'entreposage de décroissance thermique

6.9.2 La manutention des colis HA et des casiers dans un hall assurant la radioprotection

Dans le concept HA1 initial, la dalle supérieure qui recouvre les fosses d'entreposage assure une fonction de radioprotection suivant une conception reprise de l'entreposage E-EV-SE de La Hague. Le hall de manutention est donc accessible aux opérateurs qui peuvent y réaliser directement des opérations de maintenance. Les opérations de manutention sont télé-opérées mais une hotte de radioprotection entoure les colis pour la mise en casier et une autre hotte d'une masse de 250 tonnes, entoure les casiers pour l'introduction dans les puits d'entreposage comme le montre la figure 6.3-5. Cette disposition permet aux opérateurs d'intervenir en cas de panne sur les composants accessibles des systèmes de manutention.

L'évolution étudiée consiste à appliquer la principe de manutention de l'entreposage CASCAD (chapitre 3). Cela consiste à conférer la fonction de radioprotection pendant les opérations de manutention au hall de manutention plutôt qu'aux hottes. Dans cette conception, l'accessibilité aux systèmes de manutention n'est possible qu'en l'absence de colis et après fermeture des puits d'entreposage. Elle impose donc qu'en cas de panne pendant les opérations de manutention, l'intervention soit télé-opérée ou le retrait des colis et la fermeture des puits puissent être assurés par un système de secours.

Une telle évolution de conception permet une série de simplifications :

- Les hottes de radioprotection sont supprimées. Le pont transbordeur qui déplaçait les casiers pour les empiler dans les puits est allégé de 250 tonnes. Il est remplacé par un pont portique dont la capacité de levage est limitée à 30 tonnes.
- La cellule blindée dans laquelle les colis HA étaient placés dans les casiers et la navette de transfert des casiers (voir la figure 6.3-5) sont supprimées, Cette opération est réalisée dans le hall de manutention.
- La chaîne cinématique suivie par les colis depuis l'extraction de l'emballage de transport jusqu'au placement dans le puits d'entreposage, comporte une seule rupture de charge au lieu de deux (un transfert du colis de l'emballage de transport dans le casier et un placement du casier dans le puits d'entreposage).

En contrepartie :

- L'enveloppe légère en bardage acier qui entourait le hall de manutention dans le concept HA1 initial, est remplacée par une structure en béton armé avec voiles et couverture d'une épaisseur de 1,6 m environ assurant la radioprotection pendant les opérations de manutention.
- Un chariot manipulateur de secours automoteur et télécommandé est conçu pour suppléer le système de manutention après une panne. Il vient se placer sous le pont portique, au droit d'un casier affalé sur la dalle ou au fond d'un puits pour le soulever, le déplacer et venir le déposer dans un puits de secours. Ensuite le même chariot manipulateur vient placer les bouchons de radioprotection sur les puits d'entreposage et de secours.
- Ce chariot manipulateur est capable également de suppléer à une défaillance du système d'extraction des colis des emballages de transport et de placement dans les casiers en reprenant les colis pour les replacer dans leur emballage de transport ou dans un puits de secours.

6.9.3 L'amélioration de la robustesse de l'installation face aux agressions internes et externes

<u>Risque de chute de colis</u>

En cas de chute de colis en cours de manutention, le casier en alliage d'aluminium tel que décrit sur la figure 6.9-1 peut résister à une hauteur de chute de 2 m sans déformation notable.

Si la chute survient au-dessus d'une dalle, les colis primaires contenus dans le casier ne perdront pas leur capacité de confinement puisqu'ils sont en mesure de résister, sans protection à une chute de 2 m.

Si la chute survient dans un puits, elle sera amortie par un effet de piston ; l'air qui remplace l'hélium dès l'enlèvement du bouchon se mettra en pression sous le casier et s'écoulera dans le jeu périphérique qui sépare la surface latérale du casier de la paroi du puits.

Pour améliorer le coefficient de perte de charge, le casier est doté de rainures en partie inférieure (sur quelques centimètres) de manière à créer un joint labyrinthe représenté sur la figure suivante.

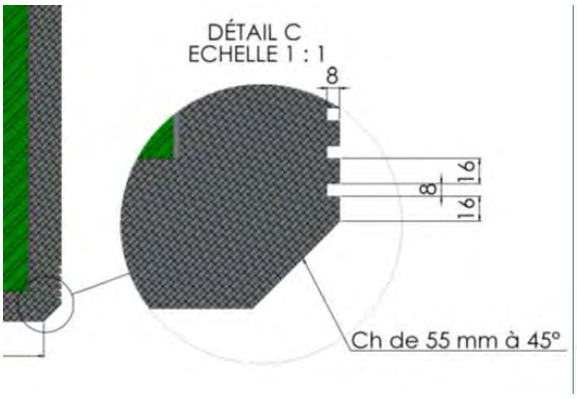


Figure 6.9-3 Joint labyrinthe assurant un bon coefficient de perte de charge dans l'écoulement de l'air autour du casier en cas de chute accidentelle dans un puits d'entreposage

Le tableau ci-après indique que pour un jeu latéral de 12 mm entre le casier et le chemisage du puits, la surpression d'air s'établit à 34 kPa, la vitesse de chute se stabilise à 1,6 m/s se qui équivaut à une chute libre non amortie d'une hauteur de 13 cm.

Ces dispositions constructives sont en mesure de permettre la suppression de l'amortisseur de chute de fond de puits et de gagner sur la hauteur totale des puits d'entreposage.

Tableau 6.9-2 Vitesse stabilisée de chute d'un casier dans un puits d'entreposage dans l'hypothèse d'un Jeu de 12 mm et d'un coefficient de perte de charge : K = 6 et présentation des paramètres correspondants

Amortissement pneumatique de la chute d'un casier dans un puits	
Diamètre casier (m)	1,6
Jeu diamétral (m)	0,012
Masse du casier (kg)	7020
Section interne puits (m²)	2,0409
Section casier (m²)	2,0106
Section du jeu (m²)	0,0303
Hauteur de chute (m)	14
Surpression (Pa)	34 kPa
Coefficient de perte de charge K (estimation)	6
Masse volumique de l'air à 80 °C (kg/m3)	1
Vitesse max de l'air dans le jeu (m/s)	107
Vitesse de chute stabilisée du casier (m/s)	1,6
Hauteur de chute libre équivalente (m)	0,13

Risque de chute d'aéronef

Les évolutions de conception étudiées peuvent améliorer la résistance de l'installation au risque de chute d'avion. Le renforcement des épaisseurs du toit et des voiles du hall de manutention et des fosses d'entreposage (de l'ordre de 1,6 m) aux fins de radioprotection devrait aussi permettre de protéger l'installation d'une chute d'avion type Cessna ou Learjet voire d'un avion de chasse du type Rafale.

Il est à noter que dans le concept HA1 initial, la dalle de radioprotection qui recouvre les fosses d'entreposage peut assurer cette fonction de protection. Cependant les ouvertures circulaires donnant accès aux puits constituent des points de faiblesse (par exemple des voies possibles d'écoulement de carburant).

Une architecture semi enterrée avec une implantation de fosses d'entreposage sous le niveau du terrain naturel serait favorable à la fois à la radioprotection et à la résistance à la chute d'avion. Pour cela il faut que le site d'implantation présente des conditions géotechniques propices.

Dans ce cas l'épaisseur les voiles et de la couverture du hall de manutention pourrait être réduite en recouvrant l'ouvrage d'un remblai de protection.

Tenue au séisme

La tenue au séisme des entreposages en puits vertical et ventilation naturelle dérivés de l'installation E-EV-SE de La Hague implique une résistance de ces composants à des forces horizontales et une stabilité des empilements.

Dans le concept HA1 initial, le placement des colis dans des casiers, l'augmentation du diamètre des puits d'entreposage et la réduction de 12 à 9 des empilements ont amélioré la stabilité aux séismes.

Dans le concept optimisé, les casiers massifs en alliage d'aluminium sont empilés sur 7 niveaux seulement et comporte un centrage périphérique par chanfreins coniques. De cette façon les déplacements horizontaux en cas de séismes n'endommageraient pas le chemisage du puits d'entreposage qui constitue une barrière de confinement.

6.10 Les évolutions possibles du concept HA2 dans une optique d'optimisation (entreposage sur dalle et ventilation mécanique horizontale)

6.10.1 L'entreposage modulaire et la chaîne cinématique de manutention

Pour mémoire l'entreposage est composé d'alvéoles superposées dans des modules multi-étages. Les colis sont déposés verticalement sur le plancher de ces alvéoles. La ventilation mécanique assure le refroidissement par une circulation horizontale de l'air dans les modules d'entreposages qui grâce à un filtre de très haute efficacité (THE) en sortie, constituent une barrière de confinement. Entre les voiles et les parois calorifuges verticales qui les protégent d'un échauffement excessif circule une ventilation secondaire de refroidissement.

La figure suivante présente les évolutions de conception étudiées dans l'optique d'une d'optimisation. Les modules multi-étage sont disposés en rayons autour d'un puits central. L'air de ventilation est distribué dans les niveaux par ce puits dans lequel est ménagé un monte-charge muni d'une plate-forme tournante. Un chariot circulant sur rails apporte en partie basse les colis HA. Il est amené par le monte-charge au niveau désiré et il est orienté grâce à la plate forme tournante dans l'axe du module choisi, où il pénètre par un porte blindée et circule par une allée centrale jusqu'au droit de l'alvéole d'entreposage.

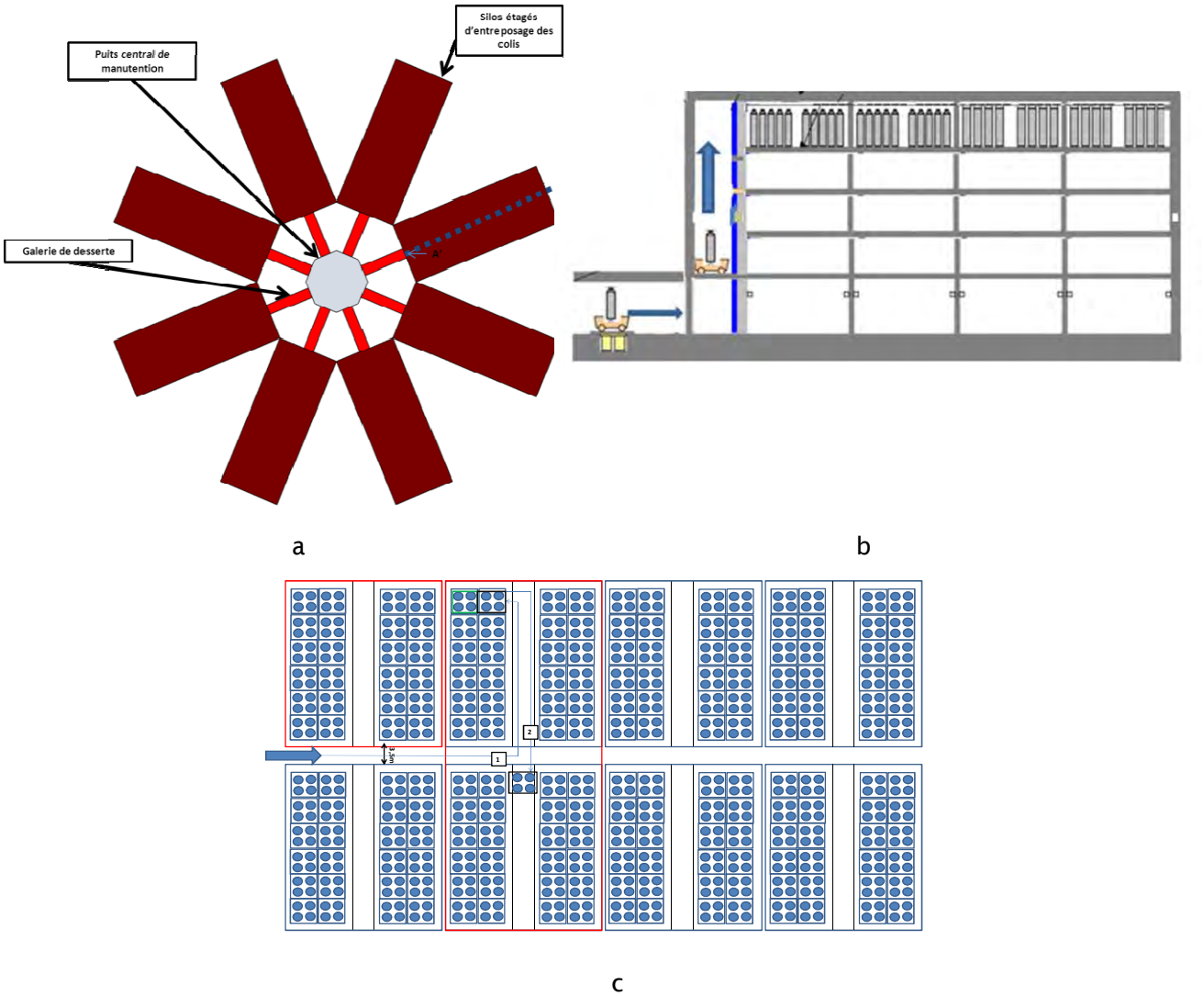


Figure 6.10-1 Architecture optimisée du concept d'entreposage HA2

(a) disposition rayonnante des modules autour d'un puits central
(b) desserte des 5 niveaux d'un module par un monte-charge avec plate-forme tournante
(c) vue en plan d'un niveau avec une disposition les alvéoles en 4 travées desservies par des allées centrales

Le chariot de manutention entre dans les alvéoles par des tronçons de rails en courbe. Les colis sont placés par groupes de quatre dans leur position d'entreposage à l'aide d'une fourche téléscopique qui opére à droite ou à gauche suivant l'orientation qui est donnée au chariot au départ du cheminement dans l'installation.

L'architecture et le système de manutention choisis induisent les évolutions suivantes du concept HA2 initial :

- Les ponts roulants qui déchargeaient le chariot de manutention en entrée d'alvéole et plaçaient les colis en position d'entreposage sont supprimés.
- La hauteur sous plafond des alvéoles est réduite à 2 mètres diminuant ainsi la section du flux de ventilation.
- La chaîne cinématique ne comporte qu'une rupture de charge correspondant au chargement du chariot de manutention.
- La hauteur de chute potentielle d'un colis ne dépasse pas sa propre hauteur et intervient lors du chargement du chariot de manutention.

En contrepartie :

- Le nombre de colis HA entreposés par unité de surface de plancher et par unité de volume utile est abaissé. Pour les colis CSD-V, elle passe de 1,6 colis par m^2 / 0,35 colis par m^3 dans le concept HA2 à 0,4 colis par m^2 / 0,2 colis par m^3 dans le concept issu de l'optimisation.
- L'accés à un colis donné peut donner lieu au retrait de 8 colis alors que dans le concept HA2 initial, l'accès par le pont roulant est possible moyennant le déplacement de 4 colis.

6.10.2 Le regroupement des colis dans des casiers ajourés et la canalisation de la ventilation

A l'admission dans l'entreposage, les colis HA sous la forme primaire ou de stockage, sont regroupés par quatre, dans un casier à base carrée. Celui-ci est déposé dans le chariot de manutention qui l'amène par le monte-charge et les allées centrales des niveaux d'entreposage et des alvéoles en position d'entreposage. Le rangement de part et d'autre de l'allée centrale est effectué sur deux lignes de casiers.

Le casier schématisé sur la figure ci-après est ajouré. Il repose sur 4 pieds de façon à limiter la diffusion de la chaleur produite par les colis dans la dalle de plancher. En partie haute du casier, une plaque percée de trous au diamètre des colis assure leur stabilité. Deux plaques verticales et parallèles (qui ne sont pas représentées sur la figure) sont disposées sur deux côtés opposés de la section carrée de façon à canaliser la ventilation.

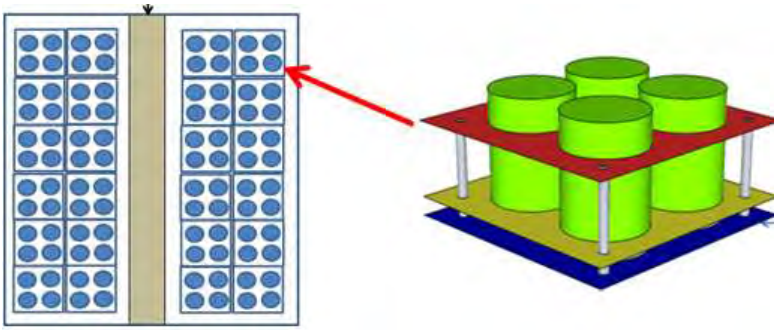


Figure 6.10-2 *Casier ajouré pour la manutention sur chariot des colis de déchets HA sous les formes primaires et de stockage. Une fourche montée sur le chariot de manutention assure la dépose dans l'alvéole d'entreposage sur deux rangs*

L'air est soufflé en partie basse du puits central, filtré et distribué dans chaque module par des carmeaux en béton qui desservent tous les niveaux par des bouches en acier inoxydable avec registre réglable.

L'air entre dans une travée, c'est-à-dire un ensemble de deux alvéoles situées de part et d'autre de l'allée centrale de desserte par la façade externe d'une alvéole et il sort par une bouche similaire située sur la façade externe de l'alvéole en vis-à-vis. L'air remonte ensuite par un carneau en béton vers les ventilateurs d'aspiration situés en parte haute du module et refoulé par la cheminée. En cas de panne des ventilateurs, une circulation de l'air par thermo siphonage permettrait de disposer d'un temps de réponse avant de pouvoir rétablir la ventilation mécanique.

Les bouches de soufflage et d'aspiration sont disposées au niveau de la dalle plancher de l'alvéole et possèdent une hauteur au dessus de la dalle qui correspond à la plaque supérieure de stabilisation des casiers. Un rangement des casiers au contact l'un de l'autre, en commençant par les emplacements situés près des bouches de soufflage ou d'aspiration va créer un alignement.

L'air de ventilation circulera préférenciellement sous les casiers pour refroidir la dalle plancher et entre les plaques horizontales et verticales des casiers au voisinage des colis.

Les casiers ajourés et la canalisation de l'air de ventilation au voisinage des colis induisent les améliorations suivantes du concept HA2 :

- Les planchers métalliques surélevés qui protègent les dalles – planchers des alvéoles et sous lesquels circule une ventilation de refroidissement est supprimé.
- Le débit de la ventilation passe de 300 à 200 m^3 par heure et par colis de 500 W entreposé,
- La stabilité au renversement des colis lors d'une manutention ou en cas de séisme est assurée.

En contrepartie :

- Les casiers aux dimensions des colis HA primaires et éventuellement de stockage sont des composants supplémentaires du concept d'entreposage.

6.10.3 L'amélioration de la robustesse de l'installation face aux agressions internes et externes

Le risque de chute de colis en cours de manutention est réduit par la limitation des hauteurs de survol au dessus des dalles - planchers et par le placement en casier qui protège les colis des chocs et évite leur renversement.

La stabilité au séisme et la résistance aux chute d'aéronefs sont améliorées par réduction de la hauteur par niveau qui passe de 5,75 m à 3,4 m.

La sécurité incendie est accrue par la réduction des quantités de matière potentiellement inflammable dans les alvéoles. Dans le concept optimisé, ces matières se réduisent à l'alimentation et aux moteurs électriques du chariot de manutention, qui peut être équipé d'un système d'extinction et être retiré des alvéoles par un chariot de secours.

6.11 Les évolutions possibles du concept HA3 dans une optique d'optimisation (entreposage en casemates modulaires avec ventilation naturelle)

Pour mémoire, les différents colis de déchets HA sous la forme primaire ou de stockage sont placés dans des emballages cylindriques appelés canisters qui sont aménagés intérieurement de manière spécifique à chacun d'eux mais qui possèdent des dimensions externes : diamètre et longueur identiques pour être placés dans des casemates polyvalentes qui se prêtent à la préfabrication. Les opérations de chargement – déchargement des canisters sont effectuées dans un atelier représenté sur la figure suivante, qui comporte des cellules blindées pour assurer leur ouverture – fermeture et le chargement des colis dans le canister. Après fermeture, ils sont remplis d'hélium et constituent une barrière de confinement. Dans le concept initial les canisters sont amenés et retirés de cet atelier de conditionnement au moyen d'un emballage de transfert interne au site qui est accosté à la casemate d'entreposage. Le placement du canister dans celle-ci passe par plusieurs phases qui sont schématisées sur la figure.

L'étude d'optimisation a consisté à réviser la conception du canister et celle de l'emballage de transfert de manière à ce qu'ils puissent satisfaire à la réglementation du transport (type B).

Les améliorations suivantes sont ainsi apportées :

- Sous réserve d'adaptations éventuelles de leurs outils de manutention des emballages et des colis, des ateliers de conditionnement en emballages de transport situés sur d'autres sites peuvent se substituer à celui du site d'entreposage.

- La capacité d'adaptation de l'entreposage en casemate est accrue : l'installation est plus simple et sans doute plus rapide à construire ; une fois réalisée, les colis peuvent y être amenés ou peuvent en être retirés plus rapidement.

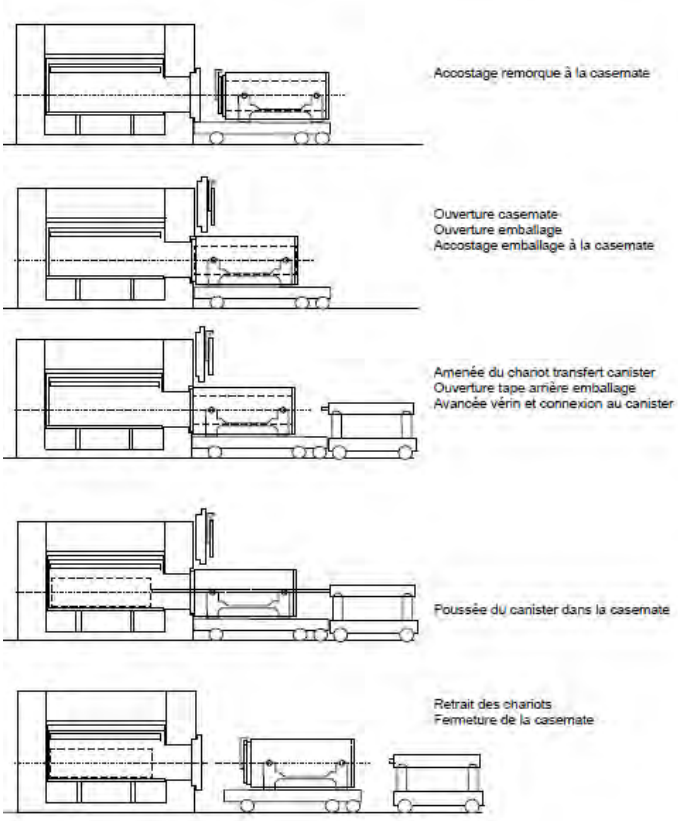


Figure 6.11-1 *L'emballage de transport interne et le placement du canister contenant les colis de déchets HA dans la casemate d'entreposage du concept HA3 dérivé du NUHOMS*

7

Options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets MAVL

7.1 Introduction des études 2007-2009 d'options techniques d'entreposage de colis de déchets MAVL 260

7.2 Principales questions techniques 262

7.3 Etude de faisabilité d'un entrepôt avec rayonnages 274

7.4 Etude de faisabilité d'un entrepôt avec longrines exploité par navettes 280

7.5 Etude de faisabilité d'un entrepôt à faible profondeur 283

7.6 Bilan des études 2007_2009, axes d'optimisation 288

7.7 Les évolutions possibles du concept d'entreposage MAVL dans une optique d'optimisation 290

Ce chapitre présente les recherches et études effectuées depuis 2007 sur des options techniques innovantes d'entreposage de colis de déchets MAVL.

Jusqu'en 2009 et dans le cadre d'une démarche exploratoire similaire à celle adoptée pour les colis de déchets HA, les recherches en matière d'ingénierie ont été réalisées en collaboration avec Areva TA (en groupement avec Arcadis) d'une part et Tractebel Engineering (Itena, Coyne et Bellier) d'autre part (§ 7.1). L'Andra en a défini les principales données d'entrée.

Un recensement des pistes technologiques susceptibles de répondre aux principales questions structurant l'ingénierie d'un entreposage de colis MAVL a d'abord été effectué : le mode de manutention, les principes d'architecture, la gestion des gaz générés par les colis et la surveillance (§ 7.2).

Des études de faisabilité ont ensuite été conduites sur plusieurs options de conception en surface et une option en faible profondeur (sections 7.3 à 7.5). Ces études ont permis d'identifier les forces et faiblesses des options de conception considérées. Il ressortait de ces études que le choix parmi les concepts d'entreposage dépendait fortement des besoins à satisfaire, notamment de la plus ou moins grande diversité des colis à accueillir, de la capacité recherchée ainsi que des pondérations accordées à certaines fonctions.

A partir de 2011, la deuxième phase d'études, associant Tractebel Engineering France à l'Andra, a consisté à rechercher l'optimisation d'un concept d'entreposage reprenant des options techniques étudiées précédemment. Les résultats de ces études qui portaient également sur les systèmes de surveillance des composants de l'installation d'entreposage et des colis sont rapportés aux sections 7.6 et 7.7.

7.1 Introduction des études 2007-2009 d'options techniques d'entreposage de colis de déchets MAVL

Les colis primaires de déchets MAVL présentent des caractéristiques plus variées que les colis de déchets HA. Leurs masses varient ainsi de 400 kg à 9 tonnes. Cela implique une grande adaptabilité des entrepôts lorsque l'on cherche à y accueillir différentes familles de colis primaires MAVL.

La diversité des colis primaires a deux conséquences importantes sur les principes de conception d'un entrepôt. D'une part, la conception ne peut pas aborder de la même manière la manutention d'un fût de 220 litres et celle d'une coque béton de 1 200 litres. D'autre part, en liaison avec le matériau constitutif du conteneur (béton ou acier), la diversité des colis conduit à une variété de comportements en situation accidentelle de manutention (chute de colis), et donc de besoins de confinement correspondant.

La diversité de contenu des colis fait apparaître d'autres spécificités vis-à-vis de la sûreté, renvoyant au dimensionnement des installations. Un grand nombre de types de colis MAVL sont soumis à radiolyse interne et dégazent de l'hydrogène. Certains colis (enrobés bitumineux) sont sensibles à une élévation de température en situation accidentelle d'incendie. Enfin d'autres colis (telle la famille F2-3-02) sont particulièrement irradiants et nécessitent des protections biologiques importantes.

En plus des colis primaires, les études ont aussi porté sur l'entreposage de colis de stockage, notamment dans une logique de soutien à la réversibilité. Les options techniques correspondantes se différentient fortement de celles adaptées aux seuls colis primaires, de par la gamme plus élevée de masses et volumes à prendre en compte (jusqu'à 6 à 20 tonnes).

La durée de vie prise en compte dans les études et recherches est d'ordre séculaire, même si la durée d'entreposage maximale d'un colis donné est en général moindre : un emplacement libéré par un colis pourra être réutilisé pour un autre colis. Par ailleurs, comme pour les colis HA, les études ont pris en compte (i) les volumes de déchets MAVL du scénario S1b du modèle d'inventaire de dimensionnement du dossier 2005 argile, en actualisant les modes de conditionnement, (ii) un découpage des installations d'entreposage en modules.

Dans une première sous-phase d'études, il a été recherché de manière aussi large que possible des solutions techniques aussi bien pour les colis primaires que pour les colis de stockage. Cette sous-phase d'études a conduit à une large liste de solutions techniques envisageables.

Au terme de cette sous-phase, sur la base d'une analyse multicritères[188], trois options de conception originales en surface[189] ainsi que la meilleure des solutions techniques adaptées à la faible profondeur ont été retenues pour un approfondissement d'étude. Ces options correspondent à une recherche de grande polyvalence et/ou d'entreposage de colis de stockage. En effet, lorsqu'on ne considère qu'une variété restreinte de colis primaires, aucune solution véritablement originale n'a émergé de la première sous-phase d'études, par rapport aux principes de conception déjà mis en œuvre industriellement.

Pour l'une des trois options retenues en surface, l'approfondissement d'études a fait apparaître des difficultés. L'étude de faisabilité de cette option n'est donc pas détaillée dans ce rapport.

Les deux options originales d'entrepôt en surface dont l'étude de faisabilité est présentée plus loin ont les caractéristiques suivantes :

1) Entrepôt avec rayonnages exploité par transstockeur[190] à satellite, dérivé de solutions logistiques industrielles. Cette solution technique sans gerbage direct des colis offre une grande aptitude à la surveillance individuelle des colis, mais est limitée par les masses de colis à entreposer (vers 4 tonnes).

2) Entrepôt sur radier avec longrines exploité par chariots navettes. L'étude de cette solution technique permet d'explorer une manutention au sol avec gerbage limité, en variante à des solutions classiques par pont roulant. Elle est adaptée aux colis de stockage mais peut aussi gérer des colis primaires au moyen de structures de regroupement. L'emploi de longrines devrait faciliter la reconfiguration de l'entreposage pour évoluer d'une famille de colis à une autre (variation d'écartement des longrines pour différentes classes dimensionnelles de colis).

En complément, l'étude de faisabilité d'une option à faible profondeur permet d'illustrer l'impact d'une implantation souterraine sur la conception et la construction d'un entrepôt de colis MAVL. Le contexte géologique de Meuse/Haute-Marne a été retenu pour mener l'étude. Une diversité maximale de colis a été considérée, à la fois sous forme de colis primaires et de colis de stockage. En plus de sa compatibilité avec une implantation à faible profondeur, l'architecture retenue pour l'étude permet d'explorer une variante aux entrepôts traditionnels sur radier ; elle est très différente des options de conception à faible profondeur présentées au chapitre 6 pour les colis de déchets HA.

[188] Les critères pris en compte sont identiques aux études présentées au chapitre 6 sur les déchets HA : (i) coût, (ii) sûreté et sécurité, (iii) résistance aux agressions externes, (iv) flexibilité et modularité, (v) évolutivité et risques.
[189] sur un total de 15 concepts techniques en surface dont 4 pour colis de stockage
[190] ou table à ciseaux pour les objets à manutentionner les plus lourds

7.2 Principales questions techniques

Le choix d'options de conception pour l'entreposage de colis de déchets MAVL renvoie principalement[191] aux points suivants :

- la recherche de polyvalence, lorsque cela est pertinent ;
- la capacité d'entreposage ;
- l'option d'une gestion individuelle ou regroupée des colis primaires ainsi que le mode et les moyens de manutention ;
- l'architecture générale des modules d'entreposage,
- la surveillance des colis et de l'installation,
- la ventilation, en lien avec la gestion de gaz relâchés par certains colis de déchets.

La question de la surveillance présente des points communs avec les déchets HA. Aussi une grande partie des dispositions exposées au chapitre 6 s'applique aussi à l'entreposage des colis de déchets MAVL. De plus, ces derniers introduisent certaines dispositions particulières.

7.2.1 La recherche de polyvalence et la capacité d'un entrepôt MAVL

Les entrepôts récents présentés au chapitre 3 offrent relativement peu de polyvalence. Ils répondent généralement à un besoin de forte capacité pour un type unique de colis primaire (STE3[192], EDS, ECC…) ou pour un ensemble de colis primaires aux caractéristiques proches (CEDRA FI).

Dans le cas de CEDRA FI, le mélange de géométries de colis différentes se traduit par des palonniers de préhension spécifiques à chaque colis. L'exploitation actuelle (bâtiment 375) différencie les modes de gestion des deux types de colis en cours d'entreposage (familles F2-4-02 et F2-5-04).

La définition d'un entrepôt pour les colis primaires MAVL ne peut être dissociée du caractère plus ou moins polyvalent recherché pour cet entrepôt. Cette polyvalence peut encore être étendue si l'on considère des colis de stockage, notamment en soutien à la réversibilité : on appréciera alors l'aptitude de l'entrepôt à pouvoir être reconfiguré pour accueillir des colis de stockage après une première phase d'utilisation comme entreposage de colis primaires.

En pratique, la diversité de l'inventaire des colis MAVL peut être approchée en regroupant les colis primaires en fonction de leur masse, de leur volume et de leurs caractéristiques radiologiques. La masse et le volume constituent en effet un critère déterminant pour le choix des systèmes de manutention et des solutions de gerbage des colis ; le niveau d'irradiation influe sur les besoins en écran de protection radiologique pour les transferts hors cellule irradiante.

Trois groupes de colis primaires peuvent ainsi être identifiés :

1) <u>Un groupe de colis de masse inférieure à une tonne (groupe 1)</u>

   La majorité des colis primaires relève de ce groupe. On peut distinguer :

   a) les colis peu irradiants, parmi lesquels se trouvent les colis d'enrobés bitumineux[193] (familles F2-3-04, F2-3-05, F2-4-03, F2-4-04…)

   b) les colis fortement irradiants (famille F2-3-02…)

[191] Pour les concepts à faible profondeur, les recherches ont été aussi orientées par la prise en compte du contexte géologique et par une recherche de minimisation du surcoût de creusement.
[192] bâtiments S et ES, voir le chapitre 3
[193] Les colis d'enrobés bitumineux présentent la particularité de ne pouvoir être entreposés qu'en position verticale, afin d'éviter le risque d'extrusion de bitume hors du conteneur par fluage. Par ailleurs le bitume présente un risque d'inflammation qui peut impliquer des mesures spécifiques de prévention ou de protection pour limiter la température à moins de 100 °C à 120 °C en conditions accidentelles.

2) Un groupe de colis de masse comprise entre une et quatre tonnes (groupe 2)

Ici encore, on peut distinguer les colis fortement irradiants[194] (famille F2-3-01…) et les autres (familles F2-3-08, F2-5-04…).

3) Un groupe de colis de masse supérieure à quatre tonnes (groupe 3) : familles F2-2-03, F2-5-06 et F2-9-01.

Les études présentées dans la suite se sont focalisées sur les groupes 1 et 2. Le groupe 3 représente un nombre plus faible de colis primaires (Figure 7.2-1).

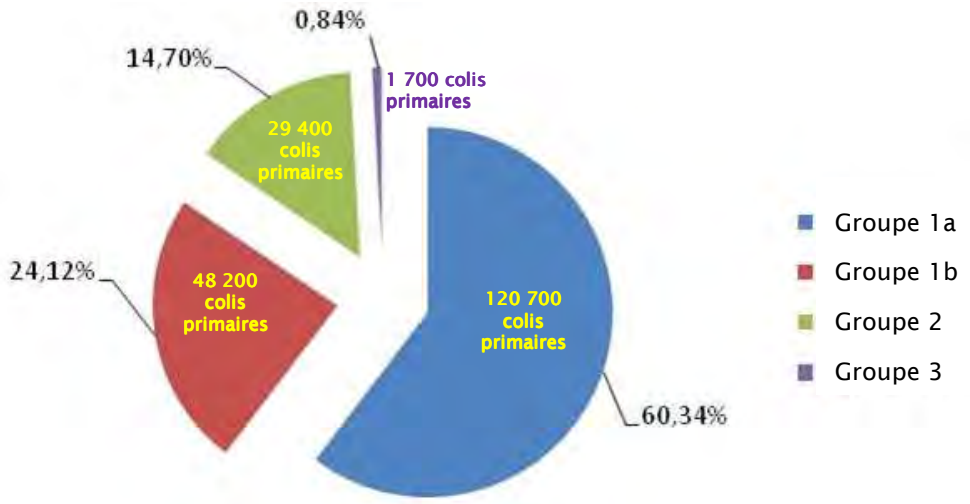


Figure 7.2-1 Répartition du nombre de colis primaires MAVL par groupes, pour les hypothèses d'inventaire retenues dans la phase 2007-2009

7.2.2 Manutention et entreposage unitaire ou groupé des colis MAVL

7.2.2.1 Manutention et entreposage unitaires de colis primaires MAVL

Les entrepôts existants, ainsi qu'une partie des options identifiées dans la première phase d'étude, adoptent une manutention unitaire des colis MAVL pour leur mise en position d'entreposage.

Arrangement des colis entreposés

Les colis primaires MAVL sont cylindriques. Par contre, les colis de stockage sont parallélépipédiques. Avec une gestion unitaire des colis, l'aptitude à la polyvalence géométrique colis primaire / colis de stockage dépend des arrangements des colis en entreposage.

Quatre types d'arrangement peuvent caractériser un entreposage (Figure 7.2-2) :

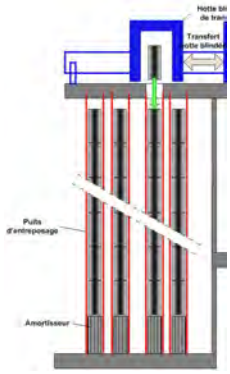
- Colis empilés verticalement dans un puits (entreposage MI de CEDRA par exemple). Cet arrangement est plutôt dédié à des colis cylindriques.
- Colis posés verticalement sur un plancher ou radier. Cet arrangement est très souple et facilite une polyvalence d'accueil de colis (colis primaires et colis de stockage) :
  - ✓ avec gerbage (entreposages de colis primaires à La Hague (STE3, EDS), Marcoule (EIP), Cadarache (CEDRA-FI), ou HABOG COVRA aux Pays Bas). Le gerbage peut se faire verticalement ou en quinconce.
  - ✓ sans gerbage (option envisageable pour colis de stockage parallélépipédiques).

[194] Les coques et embouts cimentés de la famille F2-3-01 sont des colis relativement lourds et irradiants (jusqu'environ 5 $Sv.h^{-1}$).

- Colis cylindriques posés et gerbés horizontalement.
- Colis posés sans gerbage dans des rayonnages, horizontalement ou verticalement en zone irradiante. Cet arrangement présente l'avantage d'être reconfigurable en fonction de la géométrie des colis (dans une gamme limitée). En revanche il est sensible à la masse des colis, écartant la possibilité d'un accueil de colis de stockage.

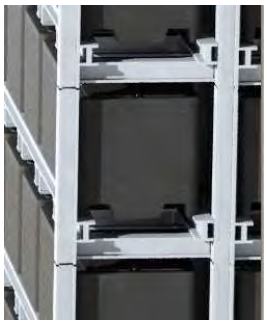
En pratique, les caractéristiques propres à chaque colis MAVL sont susceptibles de limiter les arrangements envisageables. Ainsi, les colis d'enrobés bitumineux ne doivent pas être entreposés horizontalement, à cause du risque d'extrusion de bitume hors du conteneur.

Les diverses possibilités d'arrangements d'entreposage ne présentent pas toutes la même facilité d'accès pour la surveillance. L'option sans gerbage apparaît la plus performante de ce point de vue.



Empilement en puits

Gerbage vertical en quinconce



Dépose en rayonnages

Figure 7.2-2 Exemples d'arrangements de colis en entreposage

<u>Manutention de colis unitaires</u>

Le principal avantage d'une manutention unitaire des colis est de minimiser la masse et le volume transportés. Dans un contexte d'entreposage polyvalent, son principal inconvénient est lié à l'absence de standardisation des interfaces de préhension des colis primaires, impliquant d'adapter les systèmes de préhension à chaque type de colis traité. Cette difficulté ne concerne pas les colis de stockage, qui ont été définis notamment pour standardiser les moyens de manutention dans les installations souterraines de stockage. Dans le cas d'un gerbage des colis, un autre point à examiner particulièrement avec une manutention unitaire est le risque de chute.

Divers modes de manutention sont envisageables : pont roulant, engins au sol, monorail automoteur, transstockeur.

Le pont roulant est la technologie la plus courante dans les entrepôts existants (STE3, EDS, EIP, etc.) : elle est bien adaptée à un fonctionnement en cellule irradiante, avec de hauts niveaux de fiabilité et des solutions éprouvées de dépannage d'ultime secours ; elle permet de faciliter l'accès aux zones d'entreposage, d'assurer le gerbage de colis et de minimiser les hauteurs de survol des colis. Elle nécessite de disposer d'un espace en partie supérieure pour le passage de la poutre du pont et du palonnier ou crochet de préhension, et aussi d'un espace d'approche en périphérie de la zone d'entreposage. En général, elle est associée à une préhension en partie haute des colis, via un palonnier.

Les engins au sol, de type chariot de manutention, forment la seconde technologie de référence utilisée industriellement. Il s'agit d'une solution particulièrement souple, puisqu'elle ne nécessite pas obligatoirement d'infrastructures dédiées. Ainsi, un chariot sur pneus peut être utilisé pour des colis peu irradiants (INB n° 56 à Cadarache), embarquant éventuellement un opérateur protégé par une cabine blindée (casemates de Marcoule). Cependant, dans un contexte irradiant, il est en général préféré l'utilisation d'un chariot télé-opéré et guidé sur rail pour en faciliter le dépannage (ECC). Cette famille de solutions est généralement associée à une préhension des colis par le dessous.

Le monorail automoteur est une solution techniquement plus simple que le pont roulant. Cependant elle ne permet de desservir que les zones situées à l'aplomb du rail de circulation. Cette option offre ainsi moins de souplesse que le pont.

Enfin, le transstockeur est une solution très largement développée pour des entrepôts industriels classiques, non transposée jusqu'ici au domaine nucléaire. Le transstockeur est associé à un positionnement sur rayonnage et à une préhension par le dessous. Il permet un accès aisé et rapide à chaque élément entreposé, et évite le gerbage.

7.2.2.2 Manutention et positionnement de colis primaires regroupés dans un panier ou dans un colis de stockage

Le regroupement de plusieurs colis primaires dans une structure spécifique, standardisant les modes de préhension, constitue une solution pour accroître la polyvalence de l'entreposage. Il apporte les mêmes avantages et inconvénients que ceux mis en évidence pour les colis HA (cf. chapitre 6).

On peut ainsi envisager des paniers cylindriques (Figure 7.2-3) avec par exemple :

- Un petit diamètre standardisé à 1,75 m permettant d'accueillir par exemple trois fûts de 380 litres (sur deux niveaux) ou un colis primaire béton pour une masse de 3,5 à 4,5 tonnes. Ce petit diamètre normalisé serait adapté à une architecture en puits verticaux.
- Un grand diamètre de 1,55 à 2,5 m, variable en fonction des colis primaires : par exemple, un diamètre de 2,3 m permettrait l'accueil de sept fûts de 380 litres (sur deux niveaux).

On peut aussi envisager des paniers parallélépipédiques (Figure 7.2-4) aux dimensions similaires aux colis de stockage. Cette option ouvre sur des architectures d'entreposage facilement reconfigurables pour recevoir des colis de stockage. Un panier de dimensions standardisées au sol de 1,6 m x 1,6 m permettrait d'accueillir 4 colis primaires du groupe 1 défini plus haut ou un colis primaire du groupe 2.

Les conteneurs de stockage constituent une structure de regroupement. Le nombre de colis primaires par colis de stockage est fonction de la taille et de la masse du colis primaire (voir le chapitre 4). Ainsi, les colis les plus lourds ne font l'objet d'aucun regroupement, les colis des familles F2-3-01 et F2-3-08 sont regroupés par deux et les colis les plus légers peuvent être regroupés par quatre, six ou neuf.

Les options de structures de regroupement envisagées présentent des limites vis-à-vis de la variété des colis MAVL. Les masses et dimensions des colis primaires du groupe 2 limitent les possibilités de regroupement et complexifient la structure au plan de sa tenue mécanique. Dans ce cas, seule l'utilisation du conteneur de stockage comme structure de regroupement en entreposage semble pertinente au plan technique et économique, du fait de sa mutualisation avec le stockage.

Par contre, les colis primaires de petites taille et masse (groupe 1) apparaissent plus adaptés à l'adoption d'une structure de regroupement, qu'il s'agisse d'une structure spécifique à l'entreposage et réutilisable, ou du conteneur de stockage.

Figure 7.2-3 Exemple de panier cylindrique (cas à 2x7 colis)

Figure 7.2-4 Exemple de panier parallélépipédique pour 4 fûts métalliques

7.2.3 Architectures d'entreposage des déchets MAVL

De manière similaire aux déchets HA, les architectures peuvent être décrites par le principe de juxtaposition des colis (empilement vertical ou alignement horizontal) et accessoirement par la position du colis dans l'entreposage (horizontal ou vertical).

Pour les déchets MAVL, les entrepôts existants et les options ressortant de la première phase d'étude, sont le plus souvent fondés sur une architecture horizontale : une surface horizontale plane sert de support aux colis ou à des structures métalliques de supportage des colis. Cette surface plane est en général constituée par le radier du bâtiment (ou d'une caverne à faible profondeur), mais elle peut aussi être un plancher dans un bâtiment multi-étagé (ECC).

Des variantes d'architecture horizontale consistent en un entreposage dans des tubes en surface ou dans des galeries à faible profondeur.

Enfin une architecture verticale reste envisageable avec la mise en œuvre de puits en surface ou à faible profondeur, à l'instar de CEDRA MI.

Remarque : Les spécificités d'architectures propres à une implantation à faible profondeur ont été détaillées au chapitre 6 pour les colis de déchets HA. Les solutions applicables aux colis MAVL utiliseraient les mêmes techniques (creusement par attaque ponctuelle, mixte, et au tunnelier).

7.2.3.1 Architectures horizontales sur radier

<u>Architectures sur radier avec gerbage exploité par pont roulant, ou sur longrines exploité par chariot</u>

Dans une architecture sur radier, le gerbage des colis peut s'effectuer par pont roulant ou par chariot.

Avec une manutention par pont roulant, une largeur de radier de l'ordre de 25 m correspond à la borne haute des portées habituelles. Il peut être intéressant de diviser la largeur en deux travées (Figure 7.2-5) pour limiter les portées, sachant toutefois que cela augmente la surface de radier non exploitée du fait des courses d'approche du pont (espace inaccessible en bordure de travée).

Avec une manutention par chariot, il faut en général disposer d'un plan de dépose rehaussé par rapport au plan de roulage du chariot. Pour faciliter la reconfiguration d'un module d'entreposage dans un objectif de polyvalence, une solution consiste à constituer les plans de dépose de colis par des longrines fixées sur le radier (Figure 7.2-5). L'écartement des longrines doit être suffisant pour permettre la circulation du chariot au sol et supporter les colis entreposés. Cette approche permet d'organiser des files d'entreposage sur la largeur du radier, avec une possibilité d'adapter l'écartement des longrines aux dimensions des colis ou des structures de regroupement.

Le mode de manutention influe sur la hauteur possible de gerbage des colis :

i. La manutention par pont roulant facilite le gerbage. Avec une hauteur libre de 12 m, il est alors possible de gerber en huit couches des colis primaires du groupe 1, de préférence en structures de regroupement. Les colis primaires plus lourds (groupe 2) peuvent être gerbés sur environ six couches (à adapter à la diversité des colis entreposés). Les colis de stockage (et les colis primaires les plus lourds) pourraient être gerbés sur environ trois couches.

ii. La manutention par chariot limite le gerbage à ce qui peut être effectué en tête de module lors du chargement du chariot. Une solution consiste à assurer un pré-empilage de deux colis sur le chariot. Elle réduit la hauteur libre à environ 6,5 m.

iii. Une solution mixte avec un chariot, un élévateur et un pont roulant peut aussi être envisagée, essentiellement avec des colis de stockage ou des structures de regroupement gerbés sur plusieurs couches. Le chariot transfère le colis dans une voie centrale jusqu'à une file d'entreposage (Cf. Figure 7.2-6). Un élévateur associé au chariot élève le colis jusqu'à sa cote verticale d'entreposage. Le pont reprend le colis pour le translater à altitude constante à sa position d'entreposage.

La hauteur de gerbage peut également être limitée par la hauteur de chute de colis admissible au plan de la sûreté. Enfin diminuer la hauteur de gerbage favorise les possibilités de surveillance individuelle des colis entreposés.

Dans un objectif de polyvalence, le radier peut être compartimenté pour dédier chaque compartiment à un type de colis particulier et y optimiser le mode de gerbage en fonction de ce type de colis (Figure 7.2-8).

Il est ainsi possible d'envisager :

i. Un gerbage de colis de stockage ou de structures de regroupement parallélépipédiques (base carrée 1,8 m x 1,8 m) par piles verticales en pas carré. Le nombre de couches de gerbage est à adapter à chaque cas avec un maximum envisageable de huit couches.

ii. Un gerbage pyramidal (pas triangulaire) ou vertical (pas carré) sur six couches de colis primaires en béton (groupe 2).

Un tel compartimentage est bien adapté à une manutention par pont roulant, en diminuant la largeur des travées. Il pourrait aussi faciliter la mise en œuvre de mesures de surveillance des colis ou de sûreté spécifiquement à chaque type de colis.

L'originalité et le potentiel de polyvalence de l'option de conception avec longrines exploitée par chariot, ainsi qu'un gerbage limité plus favorable à la surveillance, ont conduit à retenir cette option pour une étude de faisabilité.

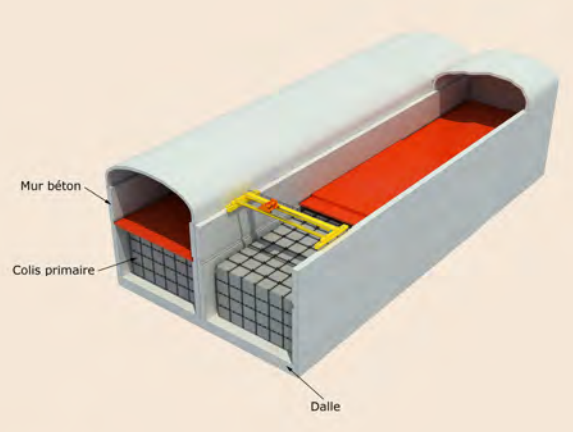


Figure 7.2-5 Architecture sur radier avec gerbage par pont roulant

Figure 7.2-6 Architecture sur radier avec longrines et dépose par chariot

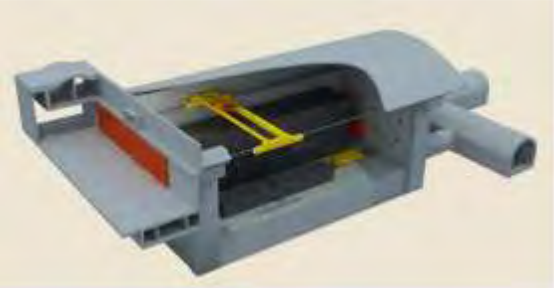


Figure 7.2-7 Architecture sur radier avec gerbage de part et d'autre d'un couloir d'accès

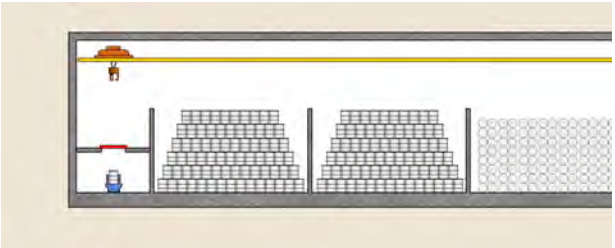


Figure 7.2-8 Architecture sur radier compartimentée avec gerbage par pont roulant

<u>Architecture avec rayonnages métalliques sans gerbage</u>

La transposition du principe du transstockeur constitue une option assez différente d'architecture horizontale. Ce procédé courant dans l'industrie est caractérisé par une capacité à accéder rapidement et aisément à chaque case d'entreposage d'un rayonnage, structure métallique ancrée au sol. Le couple transstockeur-rayonnage paraît ainsi particulièrement intéressant pour effectuer une surveillance individualisée des colis.

La mise en œuvre s'effectue des radiers comparables à ceux des architectures précédentes, avec une hauteur libre qui pourrait atteindre 15 m (Figure 7.2-9).

Cette hauteur permettrait de disposer sans gerbage neuf niveaux de colis primaires de faible masse (groupe 1) ou cinq niveaux de colis primaires plus lourds (groupe 2) avec, dans ce dernier cas, un transstockeur dimensionné à de telles charges. En ce qui concerne les colis primaires les plus lourds du groupe 3, le système de rayonnage peut être conservé, avec une limite de deux étages pour des raisons de charges statiques.

Les colis de stockage pourraient également être pris en charge, dans la limite d'une masse unitaire de l'ordre de 10 tonnes, ce qui limite la polyvalence. En effet, au-delà de cette masse, les rayonnages ne sont plus adaptés ; tout en conservant une structure d'entreposage par niveaux, une architecture multi-étagée serait plus adéquate.

De manière générale, la densité d'entreposage de colis décroît en fonction des groupes de colis, des moins lourds aux plus lourds.

Pour augmenter cette densité, il est possible de disposer plusieurs colis alignés dans une même case d'entreposage. L'introduction des colis dans la case implique alors d'ajouter un système secondaire de manutention, appelé dans la suite « satellite ».

Compte tenu de ses avantages en matière de surveillance et d'une assez bonne polyvalence pour les colis primaires, cette option originale a été retenue pour une étude de faisabilité. Cette étude présentée plus loin a montré la nécessité de remplacer le transstockeur par un autre système de manutention pour les colis les plus lourds.

Figure 7.2-9 Architecture sans gerbage et manutention par transstockeur

Architecture en bâtiment multi-étagé sans gerbage

Une autre option d'architecture horizontale sans gerbage consiste en un bâtiment à plusieurs étages. Les étages se substituent au rayonnage de l'option précédente.

L'accès à chaque étage est réalisé au moyen d'un élévateur. Les colis sont manutentionnés par chariot dans l'élévateur. Le chariot circule ensuite dans un hall et se positionne devant l'alvéole d'entreposage à desservir. Un second système de manutention permet alors le transfert du colis dans l'alvéole.

Cette option est mise en œuvre industriellement pour des colis primaires (CSD-C) dans ECC. Elle serait aussi envisageable pour des colis de stockage. Elle apparaît néanmoins relativement peu polyvalente.

La question de la longueur du radier

La longueur d'un radier est un paramètre important pour le génie civil d'un bâtiment. En effet, il existe un seuil de longueur au-delà duquel un joint de dilation doit être réalisé. Ce seuil de longueur se situe traditionnellement vers 50 m. L'expérience montre qu'il peut être porté à 60 ou 65 m grâce à l'emploi de bétons spéciaux (ECC, CEDRA).

On peut donc distinguer les architectures ne présentant pas de joint dans la zone d'entreposage des architectures de plus grande longueur avec joint.

La tenue dans le temps (typiquement au-delà de 50 ans) des joints de radier constitue un point sensible. Aussi, dans le cas d'un radier avec joint, une perspective d'exploitation séculaire suggère de pouvoir inspecter ce joint et le rénover si besoin. Deux approches sont alors envisageables : (i) éviter de positionner des colis au droit du joint et préserver son accessibilité, (ii) vider périodiquement la zone d'entreposage autour du joint pour intervention.

Une architecture sans joint présente un avantage vis-à-vis de la démonstration de la durabilité des structures et de la souplesse d'exploitation de l'entreposage. Cependant elle limite la capacité de chaque module d'entreposage.

7.2.3.2 Architectures horizontales en tubes ou en galeries

La recherche d'options techniques en galerie à faible profondeur a logiquement conduit à des architectures horizontales. Cependant l'utilisation d'une enveloppe d'entreposage cylindrique a aussi été proposée dans une application en surface, en s'appuyant sur une approche de préfabrication en série.

Tubes préfabriqués

Une architecture innovante d'entreposage MAVL en surface a été proposée dans le cadre de la première phase d'étude, consistant en des modules de petite capacité (Figure 7.2-10). A l'instar du concept modulaire de type Nuhoms présenté au chapitre 6 pour les déchets HA, les modules seraient fabriqués à la demande en fonction des besoins d'entreposage.

L'option proposée initialement se fonde sur des tubes en béton préfabriqués sur site, ménageant à l'intérieur un espace d'entreposage de deux rangées de colis gerbés sur deux couches (hauteur 4 m). Ces tubes pourraient avoir une longueur de 25 à 30 m. Leur capacité serait de près de 200 colis de faible masse (groupe 1) mis en structure de regroupement, ou de près de 50 colis primaires plus lourds voire colis de stockage de petite taille. Les tubes seraient fermés à une extrémité par un bouchon en béton de même épaisseur que les parois latérales. A l'autre extrémité, une porte en acier amovible assurerait la continuité de la protection radiologique. Vis-à-vis de la durabilité, la structure en béton proposée a l'avantage d'être monobloc, sans présence de joint de construction.

La faisabilité d'une préfabrication des tubes est conditionnée à la possibilité de les déplacer depuis l'atelier de préfabrication sur site jusqu'au lieu d'entreposage.

Une alternative serait alors de concevoir des structures de section rectangulaire coffrées in situ plutôt que préfabriquées. L'atelier de coffrage serait déplacé d'un module au suivant, technique courante par exemple dans le domaine du bétonnage de revêtements de tunnels.

La grande modularité de cette option a conduit à la retenir pour un approfondissement d'étude.

Cependant des difficultés sont apparues en cours d'étude pour la gestion de la ventilation et dans une moindre mesure, celle des interfaces de manutention.

Cette option est également pénalisée par sa faible capacité unitaire pour les colis primaires lourds ou pour les colis de stockage. Néanmoins, si des besoins d'entreposage plus précis correspondaient à son domaine d'application, cette option pourrait être revisitée pour lever les difficultés rencontrées.

Galeries souterraines

Comme pour les colis de déchets HA, des galeries d'entreposage de colis MAVL à faible profondeur peuvent être (i) courbes si construites par tunnelier ou (ii) droites si creusées par attaque ponctuelle (cf. chapitre 6).

Des diamètres de galerie de 4 à 5 m seraient compatibles[195] avec l'accueil de colis de stockage, en utilisant une manutention par chariot, avec un seul colis de stockage non gerbé dans la section de la galerie (Figure 7.2-11). Les colis primaires pourraient aussi être accueillis dans des conditions similaires via une structure de regroupement.

[195] Un creusement au tunnelier de galeries de diamètre 4 à 5 m pourrait s'appliquer à l'entreposage à faible profondeur de déchets HA (avec refroidissement) et de déchets MAVL.

Figure 7.2-10 Architecture en tubes préfabriqués (petits modules)

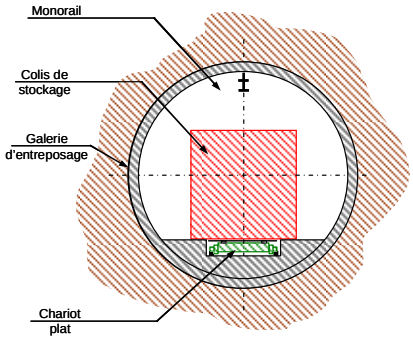


Figure 7.2-11 Architecture en galerie souterraine

7.2.3.3 Architecture verticale en puits

Une architecture d'entreposage verticale en puits n'est envisagée que dans le cas de colis primaires, cylindriques. Elle est alors comparable aux architectures présentées au chapitre 6 pour les colis HA.

En surface, les puits peuvent être suspendus ou posés dans une fosse. A faible profondeur, une option consiste à les forer dans le terrain. La profondeur des puits dépend de nombreux paramètres : la maîtrise du risque de chute, le besoin en capacité d'entreposage, l'optimisation technico-économique.

Cette approche peut être performante industriellement pour répondre à des besoins ciblés, comme c'est le cas dans CEDRA MI. En revanche elle n'apparaît pas favorable à une recherche de grande polyvalence.

7.2.4 Les possibilités de surveillance

7.2.4.1 Surveillance des colis de déchets

Les principaux objectifs d'une surveillance des colis MAVL concernent :

- le maintien du confinement des substances radioactives ;
- l'absence de risque de concentration excessive d'hydrogène (pour les colis concernés) ;
- le maintien de l'aptitude à manutentionner les conteneurs primaires métalliques (tenue mécanique et qualité des interfaces de préhension).

Une contamination de l'air pendant l'entreposage peut provenir (i) d'une contamination surfacique initiale sur la peau du colis primaire, labile à l'état initial ou le devenant progressivement (ii) d'une contamination générée par l'accumulation locale de traces de gaz radioactifs provenant des déchets ou (iii) d'une perte d'étanchéité de l'enveloppe du colis primaire[196].

Une surveillance continue de l'air de ventilation avant rejet à l'atmosphère est ainsi une première mesure permettant de suivre le maintien du confinement des colis MAVL. Une surveillance plus localisée de la contamination de l'air au contact des colis primaires, si l'architecture de l'entrepôt le permet, peut apporter un degré de confiance supplémentaire.

[196] Une radiolyse de matière organique éventuellement présente dans le colis pourrait induire à terme un risque si elle génère des produits potentiellement corrosifs vis-à-vis du conteneur (la radiolyse de matières plastiques chlorées et la présence d'eau peuvent ainsi conduire à la formation de traces d'acide chlorhydrique). Les conteneurs primaires des déchets potentiellement concernés sont conçus pour résister à une éventuelle corrosion interne pendant la période d'entreposage. L'évolution des colis vis-à-vis de ce risque peut constituer un objectif particulier de surveillance.

En complément, une mesure directe sur des colis, par sondage, peut être envisagée pour conforter la validité du programme de surveillance. Les paramètres indiqués pour les colis HA au chapitre 6 concernent aussi potentiellement les déchets MAVL.

Un prélèvement de colis entreposés puis leur contrôle dans une cellule ad hoc renvoient à une accessibilité raisonnable à tout colis entreposé, comme pour les colis de déchets HA.

Une surveillance individuelle des colis sans les déplacer implique de pouvoir amener des outils de mesure et de ménager un espace suffisant autour des colis. Cette possibilité dépend fortement de l'architecture de l'entrepôt. A titre d'exemple, le principe d'entreposage avec rayonnages développé plus loin (§ 7.3) ouvre une telle possibilité : le moyen de manutention des colis circulant librement dans les rayonnages (même en présence de colis) peut être équipé de capteurs et de caméras sur sa face inférieure, permettant des contrôles visuels et des mesures sur le colis de déchet situé juste en-dessous (Figure 7.2-12).

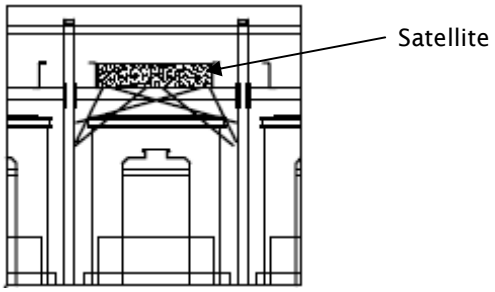


Figure 7.2-12 Schéma de principe d'une surveillance individuelle des colis dans une architecture avec rayonnages

7.2.4.2 Surveillance de l'installation

Dans une hypothèse de durabilité séculaire de l'installation, les objectifs et techniques de surveillance des structures porteuses de génie civil et des flux d'eau présentés au chapitre 6 pour les installations HA, s'appliquent aussi à l'entreposage des déchets MAVL.

Les aspects thermiques sont nettement moins marqués. Cependant certains colis MAVL présentent un faible dégagement thermique (famille F2-3-02).

7.2.5 Gestion des gaz générés par les colis de déchets MAVL

Une particularité de certains colis de déchets MAVL est la génération de gaz par radiolyse des matières organiques ou de l'eau des matrices cimentaires (essentiellement de l'hydrogène). Cette question influe sur la conception des conteneurs et alvéoles de stockage MAVL (chapitre 4). Ainsi on considère à ce stade une production maximale annuelle de 10 litres d'hydrogène à la pression atmosphérique pour chaque fût primaire (220 litres).

La question est moins sensible en entreposage du fait des volumes libres importants dans les installations[197]. Le renouvellement d'air et le faible niveau de production d'hydrogène évitent tout risque d'accumulation d'hydrogène au-delà de sa limite d'explosivité. Aussi ce risque n'oriente pas à ce stade le choix d'une architecture d'entreposage. Cependant il conduit à introduire des dispositions de sûreté adaptées : évacuation des gaz de radiolyse par la ventilation, surveillance, alarmes.

L'observation de l'évolution dans le temps de la production d'hydrogène des colis entreposés pourra constituer à l'avenir un objectif de l'entreposage, avant mise des colis en stockage. Dans ce cas, des systèmes particuliers pourraient être mise en œuvre, par exemple un éventuel compartimentage pour séparer l'observation de différents lots de colis.

[197] La sûreté à long terme d'un stockage réversible profond conduit à minimiser les volumes résiduels autour des colis dans les alvéoles de stockage.

Par ailleurs, certains déchets MAVL sont susceptibles de relâcher de faibles quantités de radionucléides sous forme gazeuse (tritium, krypton 85, argon 41, carbone 14, chlore 36). Ces radionucléides peuvent être rejetés dans la ventilation lorsque les conteneurs primaires ne sont pas étanches[198] (notamment pour éviter une accumulation d'hydrogène de radiolyse à l'intérieur). Cependant les niveaux d'activité correspondants sont très faibles. Ainsi, cette question n'influe pas à ce stade le choix d'une architecture.

7.2.6 Ventilation d'installations d'entreposage

Les risques induits par les différents types de colis de déchets, la durée d'entreposage de ces colis, la durabilité recherchée pour l'installation et le choix de l'architecture d'entreposage déterminent les besoins en ventilation à retenir parmi les suivants :

- constituer un système de confinement dynamique des substances radioactives,
- évacuer les gaz de radiolyse[199] ;
- limiter l'impact des radionucléides gazeux relâchés par les colis ;
- évacuer la chaleur dégagée par les déchets MAVL faiblement exothermiques, maintenir une température favorable au comportement et à l'évolution des colis de déchets[200] ;
- contribuer à la durabilité des conteneurs et des structures d'entreposage en contrôlant l'hygrométrie de l'air (cf. chapitre 5) ;
- renouveler l'air des locaux accessibles au personnel pour l'assainir.

Dans les architectures en surface décrites dans la suite, chaque hall d'entreposage dispose de sa propre installation de ventilation fonctionnant en circuit ouvert. Pour répondre à tout ou partie des besoins ci-dessus, elle se compose des éléments suivants :

- Un système de soufflage comprenant une centrale de traitement d'air et un réseau de gaines de soufflage (représentés en bleu sur la Figure 7.2-13).

  Les débits d'air peuvent être régulés[201] en fonction des besoins de refroidissement des colis, en tenant compte des conditions climatiques extérieures. Pour maîtriser l'hygrométrie au contact des colis métalliques (60 % HR) ainsi que la température d'ambiance dans l'entreposage, il est possible de conditionner l'air de soufflage au moyen d'une batterie froide alimentée en eau glacée et d'une batterie de chauffage.

- Un système d'extraction (en rouge sur la Figure 7.2-13).

  Un réseau de gaines d'extraction composant les différentes antennes d'extraction (placées en position haute) collecte l'air dans le hall d'entreposage. Selon les besoins en surveillance et en confinement, l'air peut alors être traité par un étage de filtration de très haute efficacité (THE)[202]. Enfin, deux ventilateurs d'extraction[203] participent à la génération du flux d'air. Leurs liaisons aérauliques à la cheminée est assurée par des conduits étanches. La cheminée de rejet peut être commune à un ensemble d'unités d'entreposage, ou spécifique à chaque unité.

- Une ligne de pression de référence, utile pour les régulations et les mesures de pressions et de débits.

---

198 Du fait de la grande mobilité du tritium, une étanchéité du conteneur pourrait atténuer le rejet de tritium dans la ventilation, mais ne permettrait pas de s'en affranchir totalement sur la durée.

199 En renouvelant l'air et en évitant les zones « mortes » dans l'installation, la ventilation dilue les gaz de radiolyse relâchés par les colis. En complément, elle peut favoriser leur évacuation hors de conteneurs en béton en maintenant une faible hygrométrie, ce qui augmente la perméabilité du béton au gaz.

200 Le maintien de certains colis déchets MAVL dans une plage de température spécifiée préserve leurs caractéristiques favorables en matière de sûreté. Un intervalle de température de [20 °C ; 30 C] peut ainsi être considéré pour les colis d'enrobés bitumineux (voir le chapitre 2).

201 La régulation peut s'effectuer en dotant chacun des deux ventilateurs centrifuges de la centrale de traitement d'air, d'un variateur de fréquence fonctionnant en mode normal/secouru par régulation pression/débit. Les flux d'air peuvent être équilibrés au niveau de chaque antenne de soufflage (en position basse) au moyen de registres de réglage.

202 Ce dernier est composé de caissons à sas étanches munis de registres amont et aval également étanches.

203 Fonctionnant en Normal/Secouru et munis chacun de registres d'isolement et de clapets anti-retours.

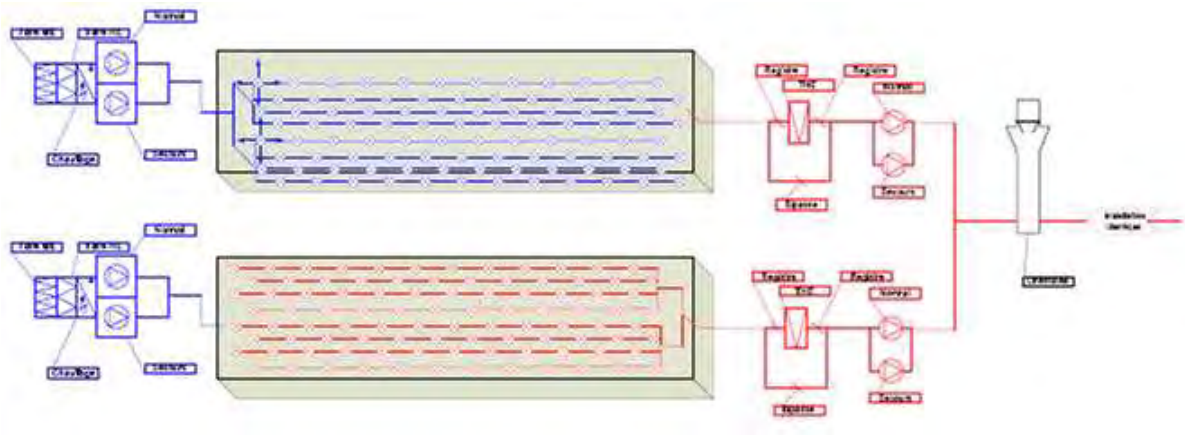


Figure 7.2-13 Schéma de principe de la ventilation d'entrepôts en surface

Dans l'option à faible profondeur décrite plus loin, le principe de ventilation de la zone d'entreposage (cavernes) est similaire, avec une extraction à débit constant[204] et une régulation des débits de soufflage pour respecter la consigne de dépression. Le débit d'extraction de chaque caverne d'entreposage est réglé en fonction d'une part des colis MAVL entreposés et d'autre part des conditions climatiques externes.

7.3 Etude de faisabilité d'un entrepôt avec rayonnages

Comme indiqué plus haut, une architecture d'entreposage sur radier avec rayonnages permet une grande accessibilité des colis entreposés, favorisant leur surveillance : d'une part, cette accessibilité autorise l'amenée de moyens de surveillance télé-opérés au contact des colis ; d'autre part, le retrait de tout colis entreposé peut être effectué rapidement avec un minimum de déplacement d'autres colis.

Cette architecture est particulièrement bien adaptée à des colis primaires de dimensions et masses réduites (groupe 1). Les rayonnages offrent dans ce cas une densité d'entreposage élevée. Le principe reste toutefois applicable aux colis primaires de plus grande masse et aux colis de stockage dans la limite de supportage de charges statiques des rayonnages, soit 10 tonnes environ.

L'étude réalisée montre les limites de la solution de manutention par transstockeur vis-à-vis des masses de colis et propose une alternative pour les colis de plus de 4 tonnes, consistant en une table à ciseaux.

L'option étudiée présente les caractéristiques suivantes :

- la prise en charge individuelle des colis (primaires et stockage) par un transstockeur ou une table à ciseaux à satellite ;
- des modules d'entreposage construits par juxtaposition de quatre halls avec la mise en commun de moyens de manutention ;
- l'adaptation du dimensionnement de chacun des quatre halls à la morphologie et à l'activité radiologique des colis qui y sont entreposés.

7.3.1 Architecture et génie civil

Chaque hall d'entreposage constitue une unité autonome, ce qui permet d'envisager une construction modulaire avec des extensions. Il comprend donc des locaux auxiliaires de fonctionnement (locaux de ventilation notamment).

[204] Les ventilateurs d'extraction sont asservis à un débitmètre en aval des caissons filtres.

Pour dimensionner un hall, l'étude s'est fondée sur une hypothèse de capacité d'entreposage de 2 750 m^3 pour le groupe 1a, soit environ 12 500 colis primaires (cf. § 1.2.1). Les dimensions du radier d'un hall sont alors de 100 m en longueur et 25 m en largeur. Les mêmes dimensions de radier ont été conservées pour les autres groupes.

Les hauteurs de hall dépendent de la configuration d'entreposage. Ainsi pour les colis primaires de moins de 4 tonnes, la conception des rayonnages permet d'utiliser au mieux l'espace disponible, notamment dans la dimension verticale, si bien que les halls d'entreposage admettent une hauteur utile de 17 m (empilage possible jusqu'à 9 niveaux). Pour les colis primaires de masse supérieure à 4 tonnes et les colis de stockage de moins de 10 tonnes entreposés sur deux niveaux, la hauteur libre se limite à 6 m.

Deux rayonnages se trouvent de part et d'autre d'une allée centrale de desserte (Figure 7.3-1). Ces rayonnages permettent d'aménager des travées (dans le sens de la largeur) et des étages (dans le sens de la hauteur). Les colis sont donc entreposés dans un « couloir » qui correspond à un étage d'une travée de ces rayonnages Les différences de taille des colis impliquent un nombre de colis plus ou moins grand par couloir.

Quelques couloirs peuvent être laissés vides dans chaque hall pour faciliter le retrait de colis à des fins de surveillance. Ces couloirs recevraient les colis qui doivent être déplacés avant d'atteindre un colis à prélever.

Les rayonnages (Figure 7.3-2) forment une structure rigide compacte solidaire, à l'instar des centres logistiques classiques. Ces rayonnages sont constitués d'échelles métalliques verticales munies de renforts latéraux et reliées entre elles par des lisses métalliques horizontales. Les lisses supportent des profilés en S appelés « fers filants ». La partie supérieure de ces fers filants supporte les colis dans le couloir d'entreposage. L'ensemble « lisse + fers filants » constitue une glissière pour le déplacement des galets du « satellite » de manutention (voir plus loin). Une fabrication des rayonnages en acier recyclé pourrait être étudiée.

Les dimensions des rayonnages dépendent des colis entreposés. Les caractéristiques dimensionnelles et capacités données au Tableau 7.3-1 visent à réduire les volumes inutilisés.

Le principe d'entreposage en rayonnages autorise, si on le souhaite, de réaliser des sectorisations dans un même hall.

Chaque hall est spécifique d'un groupe de colis. De par leur conception, les halls dédiés à l'entreposage des colis des groupes 1 et 2 excluent la possibilité d'accueillir des colis de stockage : la géométrie des structures ainsi que leur résistance à la charge statique ne sauraient supporter des masses supérieures à 4 tonnes.

Les halls envisagés pour l'entreposage des plus gros colis primaires (de masse supérieure à 4 tonnes) permettraient quant à eux d'accueillir les colis de stockage, dans une limite de 10 tonnes environ, moyennant les mêmes dispositions en termes de structures et de moyens de manutention.

Les voiles latéraux et la dalle de toit des halls, en béton armé, assurent la protection radiologique du public et des opérateurs (Tableau 7.3-2). Ils sont complétés par des portes blindées, dont l'épaisseur pourra varier de 20 à 30 cm suivant les groupes de colis.

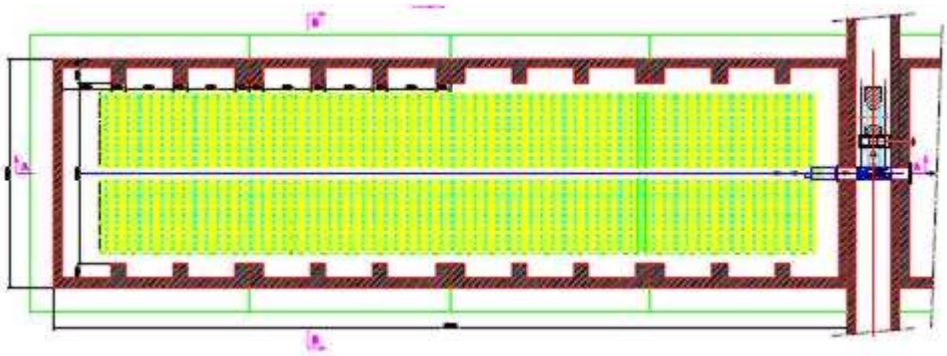


Figure 7.3-1 Schéma de hall (vue en plan)

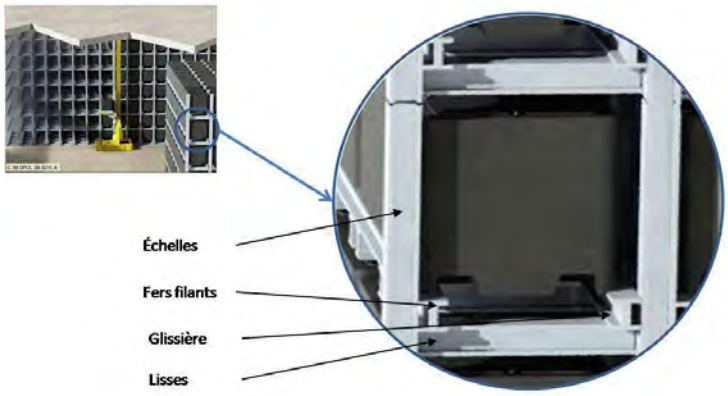


Figure 7.3-2 Schéma des rayonnages

Tableau 7.3-1 Caractéristiques dimensionnelles d'un rayonnage et capacité d'entreposage d'un hall de 2 500 m² avec rayonnages

Caractéristiques d'un rayonnage	**Groupe 1a**	**Groupe 1b**	**Groupe 2** (colis primaires < 4 tonnes)	**Groupe 3** (colis primaires < 7 tonnes)
	(colis primaires < 1 tonne)			
Nombre d'étages	9	7	6	2
Nombre de travées	64	64	64	50
Nombre de couloirs	9 x 64 = 576	7 x 64 = 448	6 x 64 = 384	2 x 50 = 100
Nombre de couloirs vacants	9	7	5	5
Nombre de colis primaires par couloir	11	11	7	5
Nombre de colis primaires par rayonnage	(576 – 9) x 11 = 6 237	(448 – 7) x 11 = 4 851	(384 – 5) x 7 = 2 653	(100 – 5) x 5 = 475
Capacité d'un hall complet (2 rayonnages)	12 474	9 702	5 306	950

Tableau 7.3-2 Epaisseurs de protection radiologique du génie civil de halls d'entreposage avec rayonnages

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Epaisseurs de béton (cm)	120	100	140
Débit d'équivalent de dose au contact (µSv.h-1)	0,07	0,2	0,09
Débit d'équivalent de dose à 30 mètres (µSv.h-1) ([205])	0,06	0,09	0,08

7.3.2 Manutention des colis

Les colis étant de géométries variables, des interfaces de manutention sont nécessaires pour standardiser les opérations de manutention avec un transstockeur, et assurer la stabilité du colis en position verticale lors de ses transferts et après la dépose en rayonnage.

Une interface de manutention peut être définie pour chaque groupe de colis. Elle est composée d'une base rectangulaire (ou carrée) sur laquelle le fond du colis primaire repose, et de broches verticales de maintien dont la position est ajustée au diamètre de colis. Ces broches assurent également une stabilité du colis posé en position verticale, même en cas de séisme. Toutefois, pour les plus gros colis (de masse supérieure à 4 tonnes), ces éléments ne sont pas nécessaires, à cause de la bonne stabilité du colis.

La mise en place individuelle des colis primaires dans un hall comprend trois phases successives (Figure 7.3-3) :

1. Amenée de l'interface de manutention vide au poste de chargement du colis.

   Le principe retenu dans l'étude est d'entreposer les interfaces vides de manutention dans les rayonnages en attente d'accueil de colis. Ainsi le transstockeur récupère d'abord une interface vide. Il l'amène ensuite vers le poste de chargement des colis.

2. Dépose du colis sur son interface de manutention.

   Au poste de chargement des colis, chaque colis primaire a été préalablement déposé sur une table d'échange. Il est alors saisi à l'aide d'une poutre roulante équipée d'un palan, motorisé en translation, et d'un préhenseur adapté. Le colis est ensuite posé sur son interface de manutention.

3. Dépose de l'ensemble « colis + interface de manutention » en rayonnage.

   Le colis et son interface sont repris par le transstockeur (via un transbordeur qui permet de mutualiser les moyens de manutention entre plusieurs halls). Le transstockeur amène le colis jusqu'à son emplacement d'entreposage.

Le retrait de colis entreposés s'effectue par inversion du processus.

Il est possible de réaliser des déposes de colis dans n'importe quel couloir. Il n'y a pas d'ordre de remplissage spécifique à respecter, si ce n'est bien sûr dans un même couloir (le premier colis dans un couloir est déposé systématiquement au fond de celui-ci).

Le transstockeur à satellite qui serait utilisé pour la manutention des colis de déchets de masse inférieure à 4 tonnes est composé de trois éléments principaux dédiés chacun à un type de mouvement (voir l'encadré). Les flux ici sont de très loin inférieurs à ceux pratiqués dans les entrepôts logistiques classiques.

[205] Le débit de dose à 30 mètres peut représenter celui en clôture de site, accessible au public.

Pour les colis primaires de masse supérieure à 4 tonnes et les colis de stockage de moins de 10 tonnes, le transstockeur doit être remplacé par un équipement spécifique assurant les mêmes fonctions. L'étude de faisabilité a montré l'existence de solutions, avec une table élévatrice à ciseaux, translatée par un chariot dans l'allée centrale et également équipée d'un satellite.

7.3.3 Ventilation

Conne indiqué plus haut (§ 7.2.6), chaque hall d'entreposage peut être équipé de sa propre installation de ventilation nucléaire. Pour un volume à ventiler de 37 000 m^3, un débit enveloppe d'environ 70 000 $m^3.h^{-1}$ peut maintenir les colis d'enrobés bitumineux à une température de 25 °C en période hivernale. La ventilation peut assurer à elle-seule l'évacuation de la chaleur dégagée par les déchets faiblement exothermiques.

Encadré 7.3-1 Eléments constitutifs du transstockeur à satellite

Châssis inférieur et supérieur reliés par un double mât vertical (pour la translation dans l'allée centrale du hall)

Guidés par des rails inférieurs (fixés sur la dalle) et supérieurs (montés sur la structure de liaison des rayonnages de part et d'autre l'allée centrale), l'ensemble est doté d'un mouvement de translation le long de l'allée centrale du hall. Le transstockeur se positionne alors en face de la travée concernée.

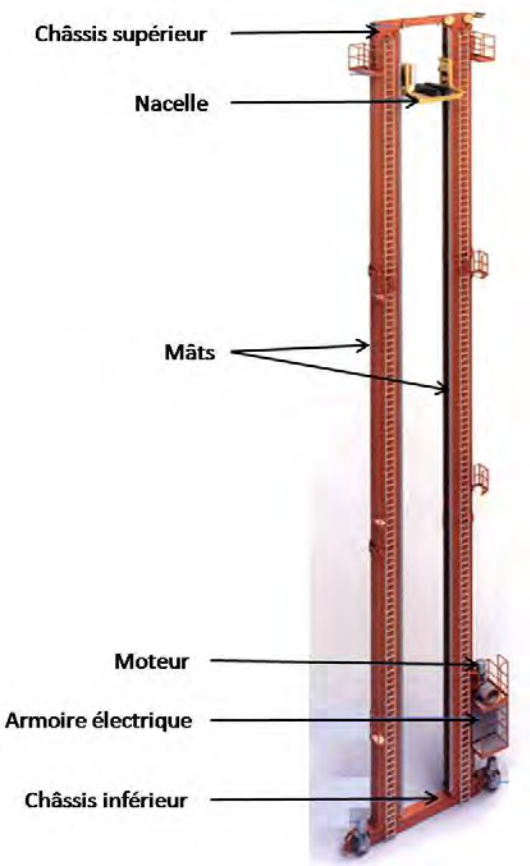
Nacelle (pour le positionnement vertical dans la travée sélectionnée)

Evoluant entre les deux mâts par lesquels elle est guidée, la nacelle est dotée d'un mouvement vertical lui permettant d'accéder à tous les niveaux de l'entreposage.

Cette nacelle constitue le support du satellite. La nacelle doit être positionnée avec précision en face du couloir d'entreposage pour assurer la continuité des rails de circulation de la nacelle et du couloir.

Satellite (pour le positionnement en profondeur dans le couloir sélectionné)

Le satellite supporte l'ensemble « colis + interface de manutention ». Porté par la nacelle pour accéder à l'étage sélectionné, il s'en libère pour se déplacer dans la glissière du rayonnage, puis dépose le colis à son emplacement d'entreposage (par un mouvement « monte et baisse » de quelques centimètres). Une fois la dépose effectuée, revient à sa position initiale sur la nacelle.



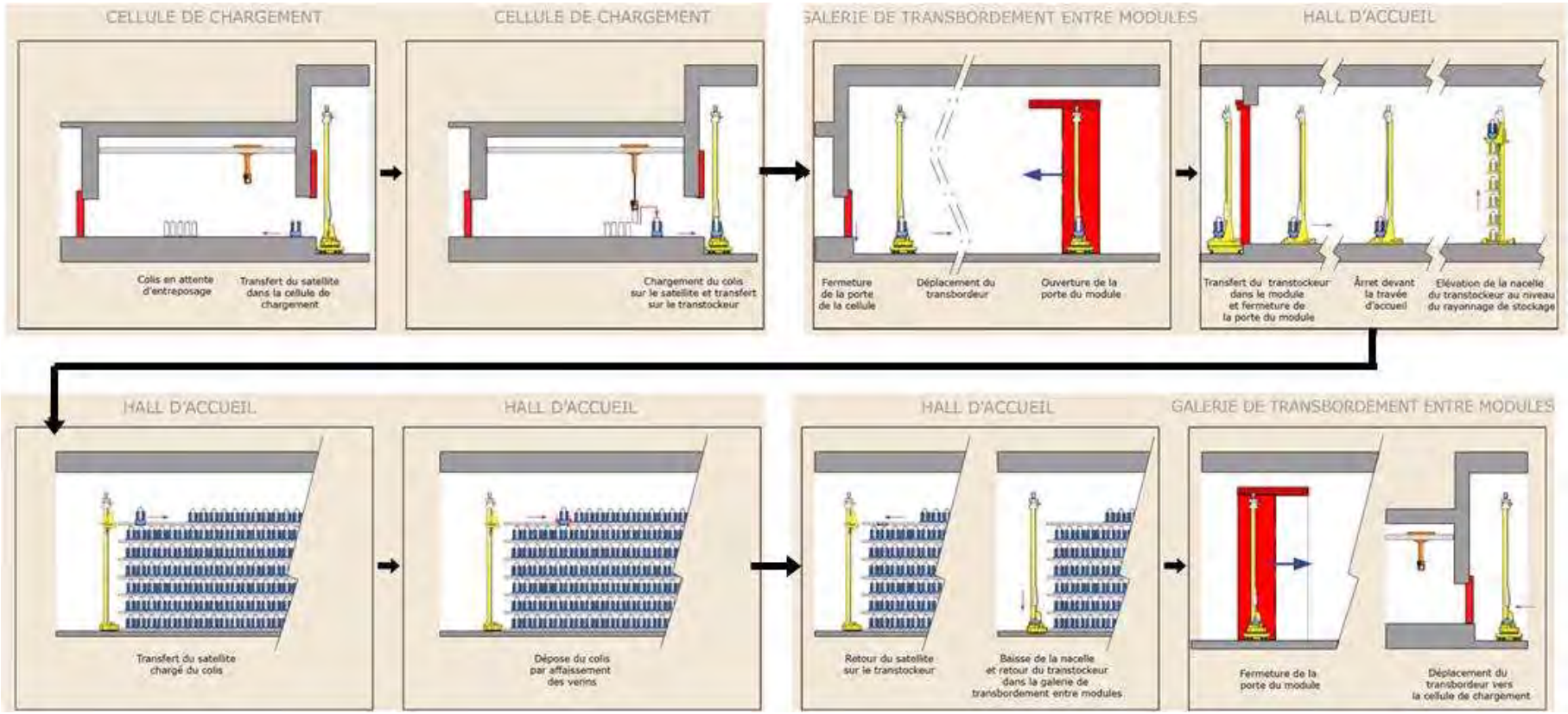


Figure 7.3-3 Synoptique de manutention par transstockeur

7.4 Etude de faisabilité d'un entrepôt avec longrines exploité par navettes

Cette option a été conçue dans l'optique d'une grande polyvalence d'accueil des différents types de colis. Les dimensionnements étudiés sont fondés sur l'entreposage de colis de stockage ; avec ces dimensionnements, la prise en charge de colis primaires sans conteneur de stockage peut s'effectuer avec d'autres types de structures de regroupement, par exemple en acier recyclé. D'autres dimensionnements pourraient être étudiés pour prendre en charge uniquement des colis primaires.

Les caractéristiques principales de cette option sont :

- la dépose des colis de stockage ou des structures de regroupement sur des longrines en béton parallèles fixées sur un radier ;
- la manutention des colis de stockage ou structures de regroupement par une double navette circulant entre les longrines : la navette prend en charge des piles de deux colis (dans la limite de 40 tonnes par pile) ou des colis non gerbés (pour les colis les plus lourds) ;
- des modules d'entreposage construits par juxtaposition de deux halls avec la mise en commun de moyens de manutention ;
- la possibilité de reconfigurer un hall d'entreposage pour accueillir d'autres types de colis, par un ajustement des longrines supportant les colis.

7.4.1 Architecture et génie civil

Les halls d'entreposage sont constitués d'une construction en béton de forte épaisseur de dalle, murs et plafonds. Ils sont desservis par une cellule de manutention (Figure 7.4-1) et complétés par une installation de ventilation.

Un aménagement de hall peut être défini pour chaque groupe de colis de déchets. Les colis de stockage, pré-empilés ou non, sont déposés en files dans la longueur du hall, sur des longrines en béton. Différents types de colis de stockage sont susceptibles d'être placés dans une même file, dès lors qu'ils présentent la même largeur. Le Tableau 7.4-1 recense le nombre de colis primaires pouvant être accueillis sur un radier de 2 500 m^2 (longueur 100 m, largeur 25 m et hauteur utile du hall 6,3 m), sous forme de colis de stockage ou dans des structures de regroupement comparables. La faible hauteur de gerbage conduit à une emprise au sol supérieure à l'option précédente avec rayonnages.

Comme dans l'option précédente, le génie civil en béton armé des halls assure la protection radiologique des opérateurs et du public. L'épaisseur des voiles de chaque hall peut être adaptée à l'activité radiologique des colis de déchets susceptibles d'y être entreposés. Quatre types de halls ont ainsi été pré-dimensionnés dans le cadre de l'étude de faisabilité (Tableau 7.4-2). L'accès aux halls s'effectue par une porte blindée mécanisée qui assure la continuité de la protection radiologique.

Tableau 7.4-1 Capacité d'un hall d'entreposage de 2 500 m^2 sur longrines

Groupe de colis	Nombre de colis
Groupe 1a (colis primaire < 1 tonne, peu irradiants) → 2 largeurs de files	1 863
Groupe 1b (colis primaire < 1 tonne, plus irradiants)	1 105
Groupe 2 (colis primaire < 4 tonnes) → 5 largeurs de files	1 657
Groupe 3 (colis primaire < 7 tonnes)	260

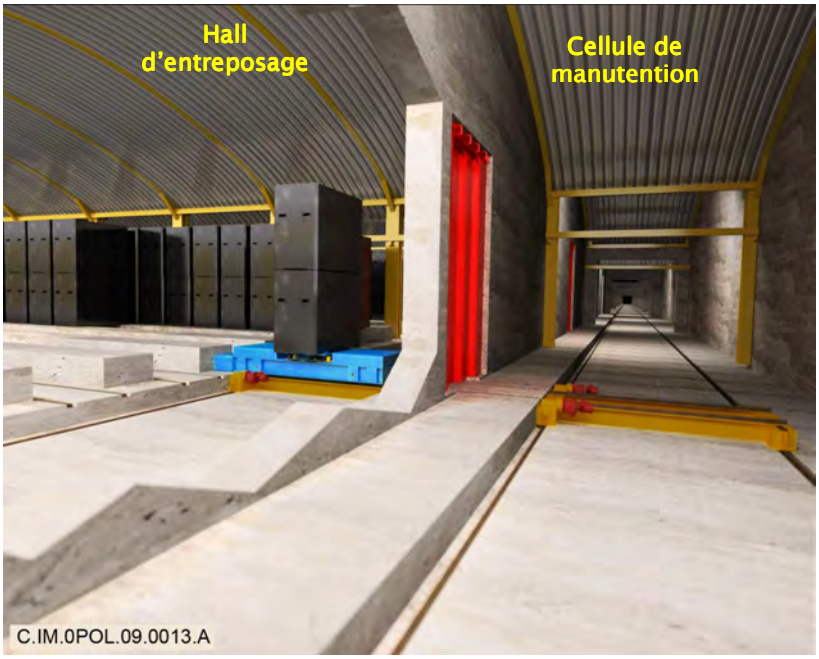


Figure 7.4-1 Schéma d'un hall d'entreposage avec longrines (écorché)

Tableau 7.4-2 Epaisseurs de protection radiologique du génie civil de halls d'entreposage sur longrines

	Colis primaires < 1 tonne		Colis primaires < 4 tonnes	Colis primaires < 7 tonnes
	Groupe 1a	Groupe 1b	Groupe 2	Groupe 3
Epaisseurs de béton (cm)	100	120	120	100
Débit d'équivalent de dose au contact (µSv.h-1)	0,2	0,14	0,1	0,4
Débit d'équivalent de dose à 30 mètres (µSv.h-1) ([206])	0,1	0,08	0,06	0,08

7.4.2 Manutention

La manutention procède en deux étapes : (i) l'empilement des colis, sauf pour les plus lourds (ii) le transfert et la dépose des colis en hall d'entreposage. Le désentreposage s'effectue par inversion du processus.

Les piles de deux colis de stockage de même nature (ou de deux structures de regroupement de colis primaires) sont constituées dans la cellule de manutention par un système de pré-empilage.

Une limite de masse de 40 tonnes par pile a été identifiée à ce stade d'étude pour la conception des navettes de transfert des colis[207].

[206] Le débit de dose à 30 mètres peut représenter celui en clôture de site, accessible au public.
[207] Des études complémentaires pourront permettre de relever cette limite de masse.

Ces navettes assurent le transfert des piles de colis ou des colis plus lourds non gerbés du poste de pré-empilage jusqu'à l'emplacement d'entreposage. Deux navettes sont utilisées (Figure 7.4-2) :

1. Une « navette support » translatant chaque pile de colis dans la file d'accueil et la déposant à son emplacement d'entreposage.

   La navette support dispose de deux axes de déplacement :

   - ✓ longitudinalement pour la circulation entre les longrines dans le hall d'entreposage,
   - ✓ verticalement pour la dépose des colis sur les longrines, grâce à un système hydro-électrique de monte et baisse de quelques centimètres.

2. Une navette de transbordement circulant transversalement dans le hall d'entreposage, déplaçant la navette support depuis la cellule de manutention jusqu'à la file d'accueil. Sa charge maximale est de 70 tonnes environ.

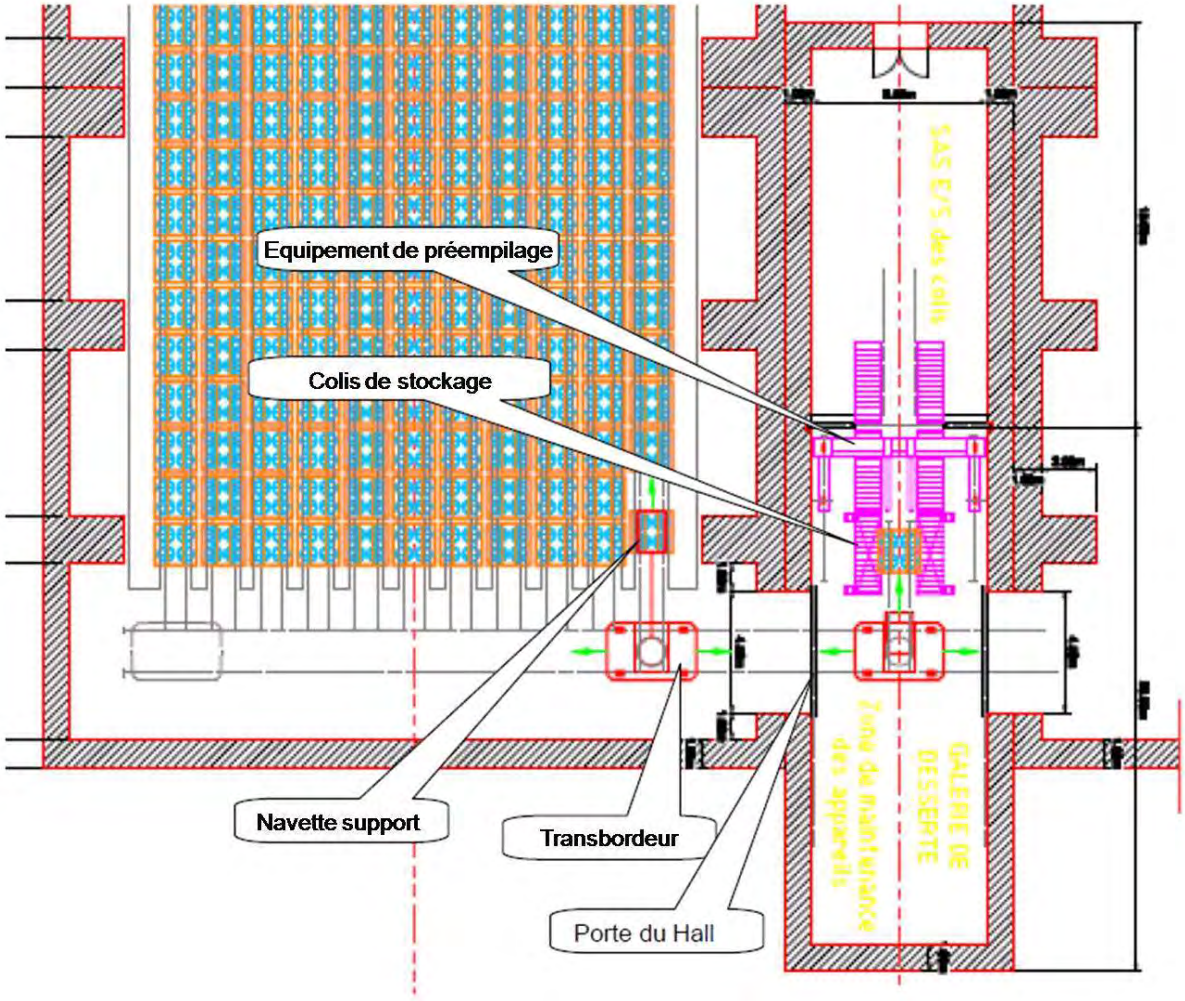


Figure 7.4-2 Synoptique de dépose des colis sur les longrines du hall d'entreposage

7.5 Etude de faisabilité d'un entrepôt à faible profondeur

L'option de conception retenue pour étudier la faisabilité d'un entrepôt de colis de déchet MAVL à faible profondeur consiste en des cavernes[208] souterraines de l'ordre de 24 mètres de hauteur et de 26 mètres de largeur. L'hypothèse utilisée pour l'étude est une implantation à une profondeur de 60 mètres (cote de la voûte des cavernes), dans une couche calcaire comparable à l'horizon K1 des calcaires du Kimméridgien rencontrés en Meuse / Haute-Marne pour le projet Cigéo.

L'entrepôt étudié permettrait l'accueil de colis de stockage ou de colis primaires placés dans des paniers.

Les caractéristiques principales de cette option de conception sont :

- Le transfert des colis de déchets sous hotte de protection radiologique dans la descenderie et les galeries d'accès aux cavernes d'entreposage ;
- La manutention télé-opérée des colis dans les cavernes par un ensemble comprenant chariot, table élévatrice et pont roulant ;
- Une standardisation des cavernes les rendant polyvalentes, chacune pouvant accueillir tous les types de colis MAVL ;
- La possibilité d'un creusement de nouvelles cavernes pendant l'exploitation de cavernes existantes.

7.5.1 Architecture et génie civil

Les cavernes sont des excavations d'axe horizontal. Leur section transversale est présentée à la Figure 7.5-1. Les colis ou structures de regroupement sont disposés sur une dalle construite en partie basse, par demi-rangées de 8 (2 piles de 4 colis) ou de 12 (3 piles de 4 colis). Une travée centrale est laissée libre pour les manutentions de colis. La partie supérieure de la caverne accueille un pont roulant de manutention se déplaçant dans l'axe de l'ouvrage.

L'installation peut être conçue pour développer sa capacité d'accueil progressivement par modules successifs. Pour cela, les deux cavernes constitutives d'un module d'entreposage sont construites de part et d'autre d'une galerie d'exploitation centrale.

A l'opposé de cette galerie centrale, les cavernes rejoignent deux galeries de travaux qui permettent notamment le transfert et la maintenance des équipements. Le phasage de réalisation est présenté par l'encadré suivant.

Deux séries de puits assurent la ventilation de l'installation souterraine, l'une étant dédiée au soufflage, l'autre à l'extraction. L'un des puits de soufflage est aussi utilisé pour l'accès aux chantiers de réalisation de nouveaux modules. Une descenderie d'exploitation permet les transferts de colis de déchets depuis la surface. Après la mise en exploitation de cinq premiers modules, l'étude montre l'intérêt de réaliser une seconde descenderie pour desservir les chantiers d'extension de l'installation. Deux puits supplémentaires permettraient l'évacuation des fumées en cas d'incendie dans une caverne ; ces fumées transiteraient au préalable par des galeries de refroidissement et de décrassage.

Enfin, des locaux de maintenance et des refuges et niches de secours complètent l'infrastructure.

[208] On désigne ici par « caverne » un ouvrage de plus grande section qu'une galerie.

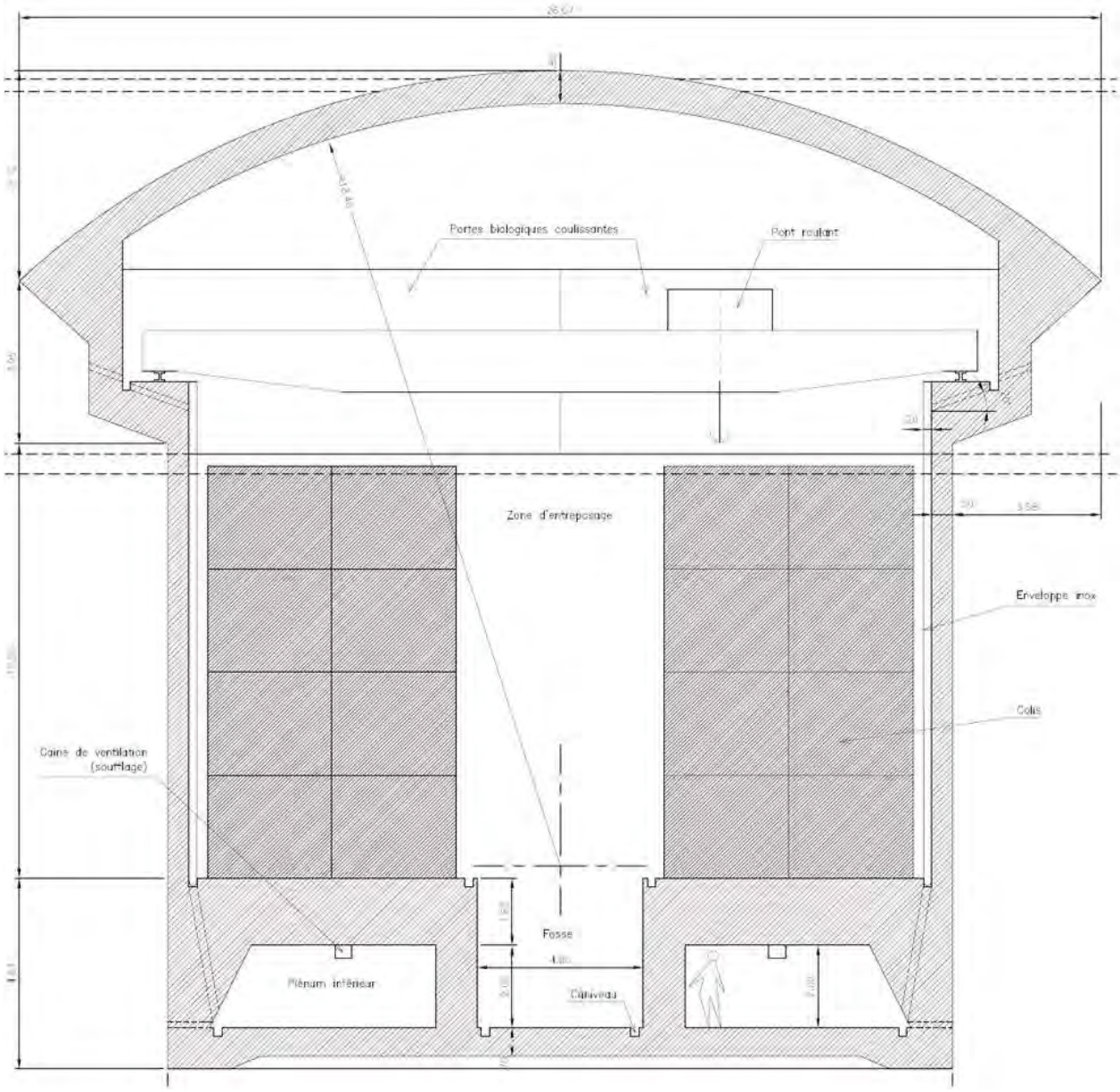


Figure 7.5-1 Section transversale d'une caverne d'entreposage à faible profondeur

Encadré 7.5-1 Phasage de construction d'un entrepôt modulaire en cavernes à faible profondeur

Phase 1 :

Avant la mise en exploitation de l'installation sont construits la descenderie d'exploitation, une partie des galeries d'exploitation et des galeries de travaux, quatre puits de ventilation/servitude (deux pour le soufflage, 2 pour l'extraction) ainsi que les galeries de refroidissement/décrassage des fumées et les puits d'évacuation de ces fumées.

Phase 2 :

Le module 1 est construit et aménagé. Des barrages étanches sont alors mis en place pour délimiter la zone en exploitation de la zone en travaux.

Phase 3 :

La construction des modules 2 à 5 est réalisée au fur et à mesure des besoins, à partir du second puits de ventilation/servitude de soufflage qui sert d'accès pour le personnel et le matériel, et pour la ventilation du chantier. Les barrages étanches sont déplacés pour la mise en exploitation de chaque nouveau module.

Phase de transition pour la création de modules supplémentaires

Avant d'étendre l'installation au-delà des 5 premiers modules, une descenderie de travaux est créée. La galerie d'exploitation et les galeries de travaux sont prolongées. Deux puits de ventilation/servitude d'extraction sont construits. De nouveaux modules peuvent alors être réalisés.

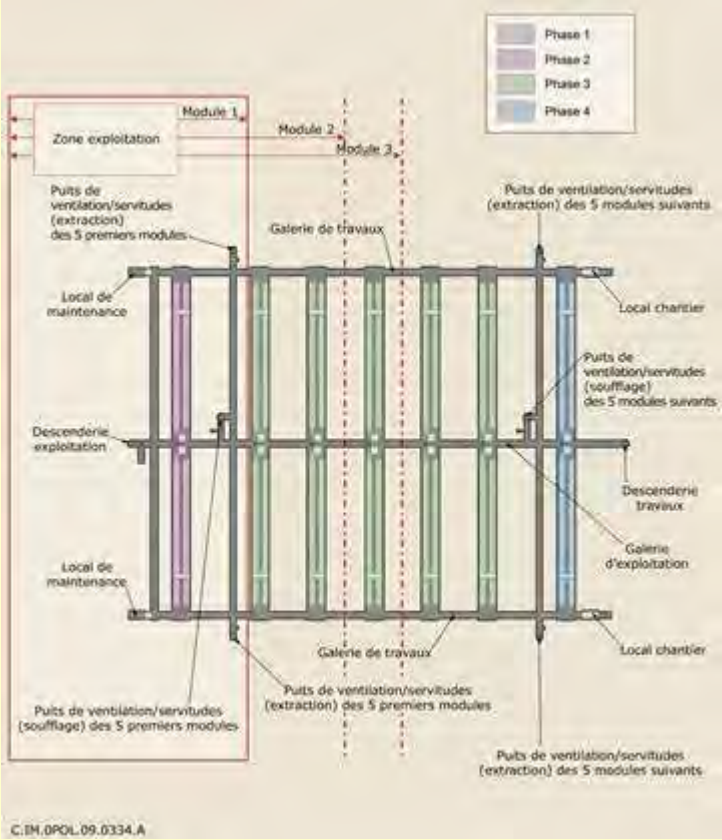


Figure 7.5-2 Phasage de construction d'un entrepôt de six modules

7.5.2 Manutention

La descenderie d'exploitation et la galerie d'exploitation qui la prolonge permettent d'acheminer les colis de déchets sous hotte de radioprotection entre la surface et le sas d'entrée de chaque caverne.

Dans le sas, le chariot s'accoste à la caverne, puis le colis (colis de stockage ou panier de regroupement) est extrait de la hotte.

La manutention dans les cavernes d'entreposage est réalisée en zone irradiante. Le colis est repris par le pont roulant de la caverne, de capacité 45 tonnes, puis est déposé sur une table élévatrice de capacité 33 tonnes montée sur chariot. Le colis est alors acheminé jusqu'à sa rangée d'entreposage en empruntant l'allée centrale. La table élévatrice élève le colis jusqu'à l'altitude d'empilement prévue. Enfin, le pont roulant place le colis à son emplacement final. La table élévatrice évite ainsi des hauteurs de survol du colis trop importantes qu'une utilisation du pont seul générerait. Le désentreposage s'effectue en inversant le processus.

La maintenance du pont de manutention peut s'effectuer à l'abri du rayonnement dans un « garage pont », séparé de la caverne irradiante par des portes blindées.

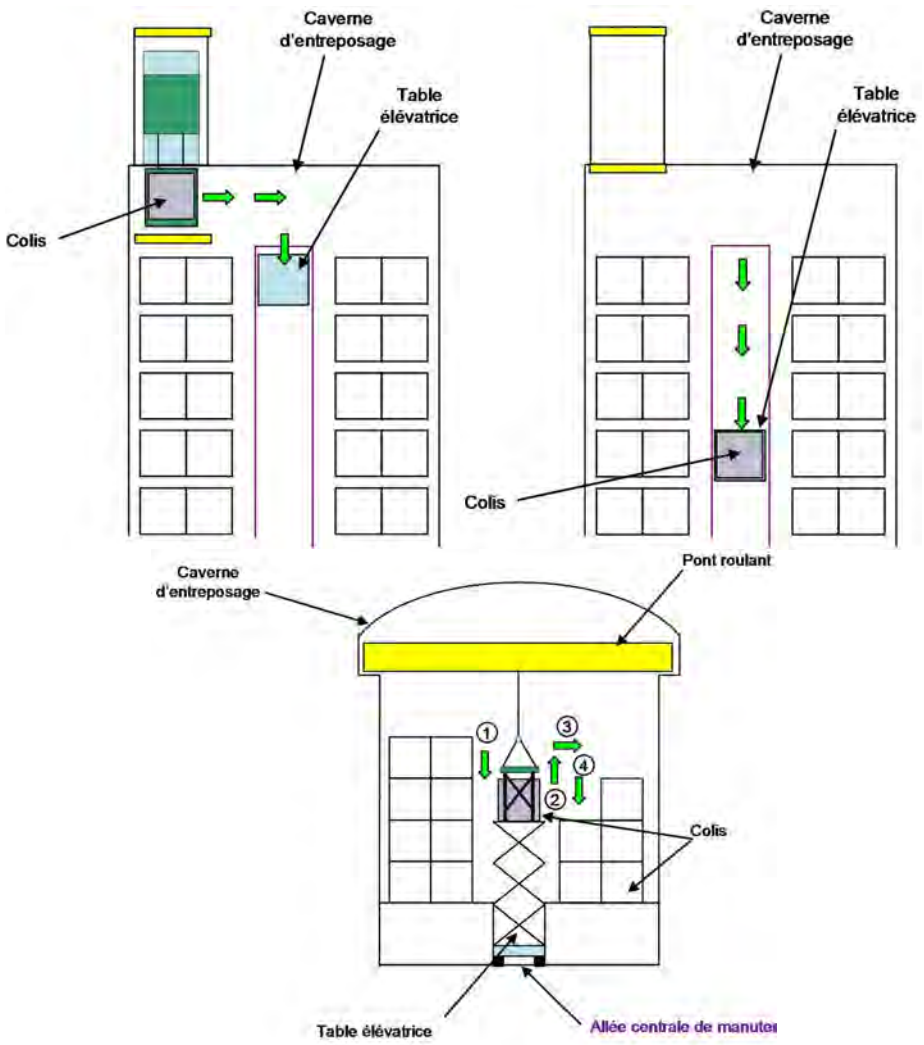


Figure 7.5-3 Synoptique de manutention en caverne : acheminement du colis au sein de la caverne et dépose à son emplacement d'entreposage

7.5.3 Ventilation

L'air prélevé à l'extérieur est conditionné en surface (centres de traitement de l'air [CTA]). Il est ensuite injecté dans les puits de soufflage (en pleine section ou dans un compartiment dédié si le puits sert aussi d'accès) puis dans la galerie d'exploitation et les galeries de travaux.

Une partie du flux d'air ventile les locaux du personnel puis transite par la descenderie d'exploitation avant rejet (Figure 7.5-4).

Une autre partie du flux de la galerie d'exploitation pénètre dans les cavernes pour les ventiler, via des ventilateurs de reprise. Une fraction du flux est dévoyée par une gaine de ventilation jusqu'à l'extrémité du plénum de la caverne afin d'assurer un brassage évitant des zones mortes. L'air extrait des cavernes est canalisé vers les puits d'extraction, contrôlé et éventuellement filtré avant rejet à la cheminée (Figure 7.5-5).

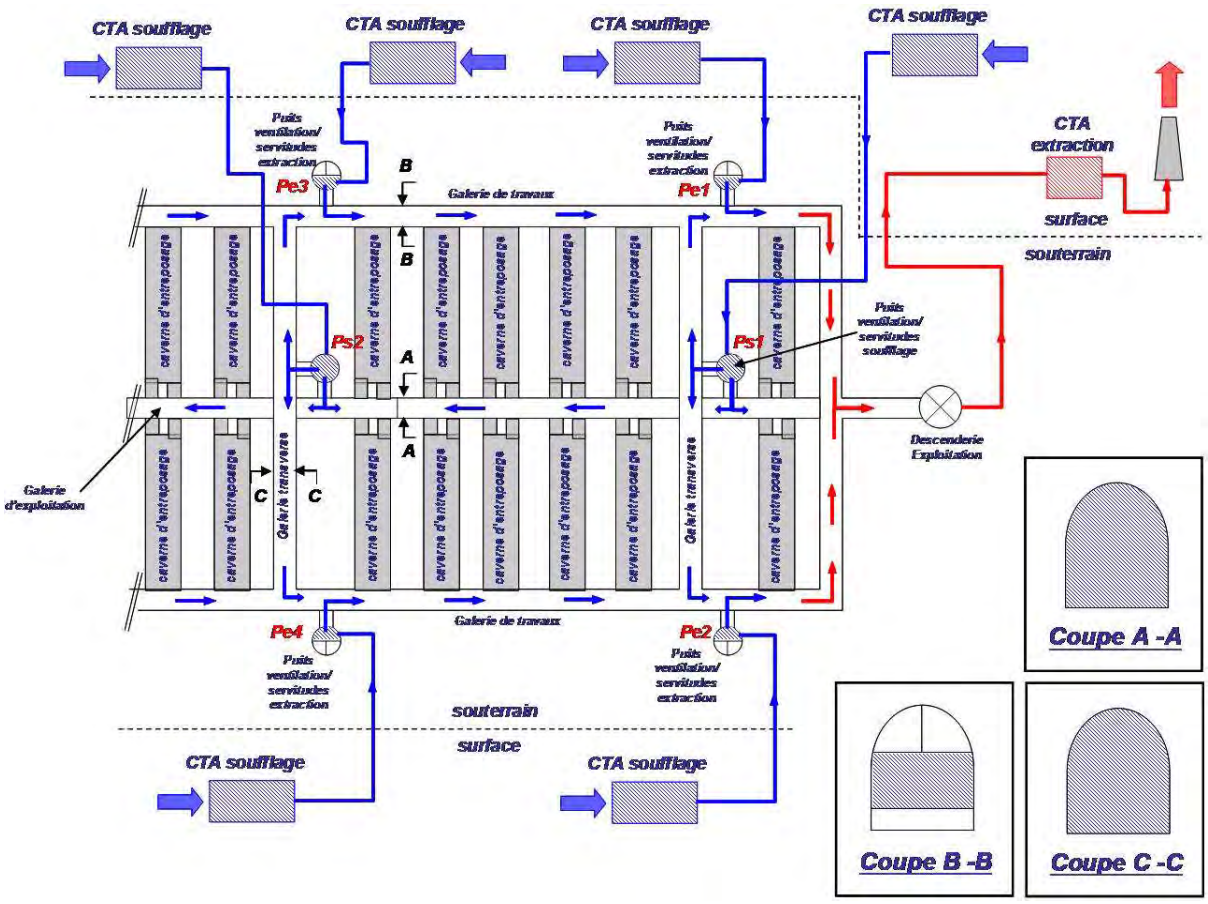


Figure 7.5-4 Ventilation des zones souterraines de présence du personnel

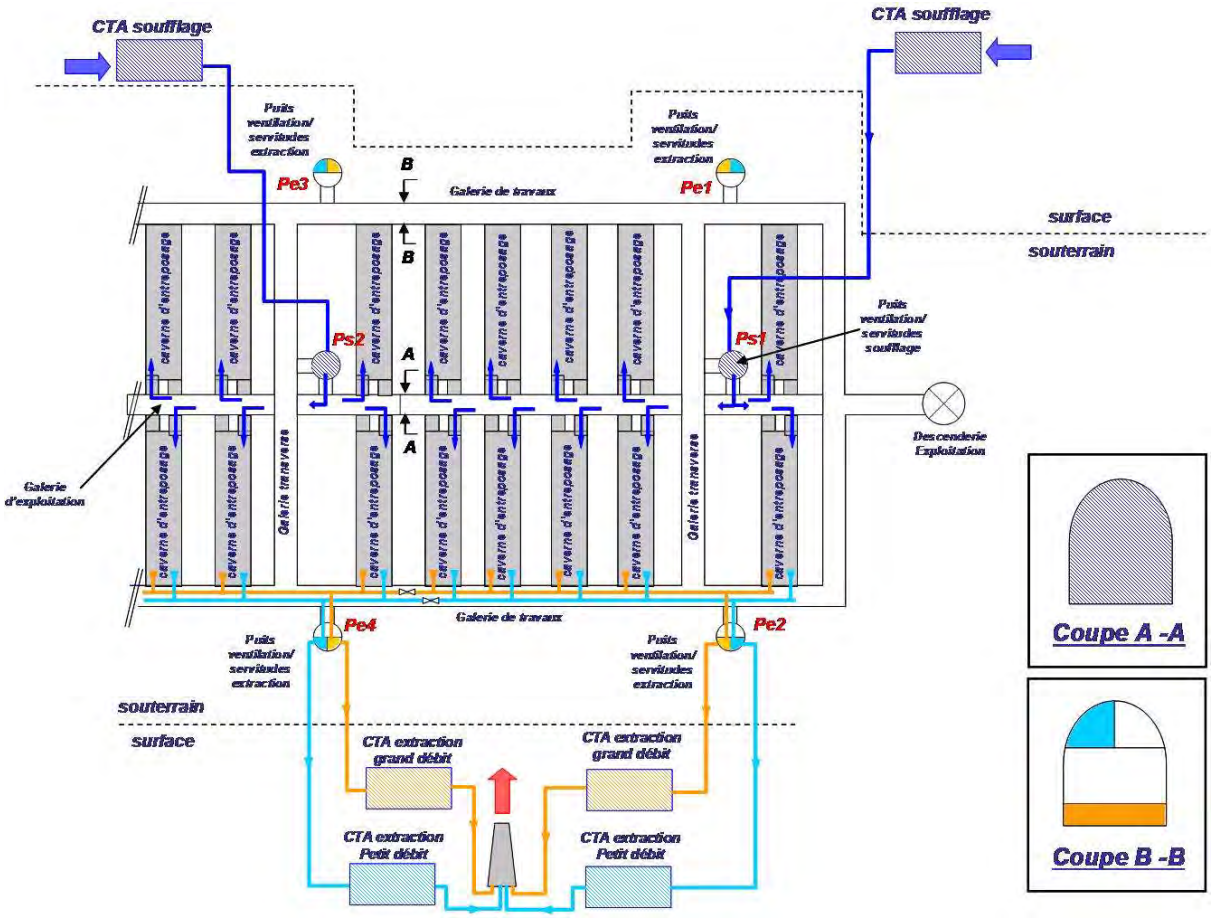


Figure 7.5-5 Ventilation des cavernes d'entreposage

7.6 Bilan des études 2007-2009, axes d'optimisation

7.6.1 L'évaluation des concepts MAVL issus des études de faisabilité

Les options de conception des entreposages MAVL qui ont fait l'objet des études de faisabilité présentées ci-dessus ont été évaluées et comparées sur la base des mêmes critères que les concepts d'entreposage HA (voir le chapitre 6) : la robustesse des fonctions de sûreté, l'accessibilité aux colis, la polyvalence, l'aptitude à la durabilité, la facilité de maintenance et la modularité. Le résultat est synthétisé sur le tableau suivant.

Afin de situer les performances de ces concepts par rapport aux entrepôts industriels existants construits suivant des principes proches, l'évaluation a porté également sur ECC et sur CEDRA MI (voir le chapitre 3).

Comme pour les concepts d'entreposage HA, il ressort que sur les plans de la sûreté, de la durabilité et de la modularité, les concepts innovants ne supplantent pas les entreposages récemment construits. Par contre ils offrent des possibilités nouvelles en matière de polyvalence, voire de facilité de la surveillance. D'une manière générale, les installations existantes sont très bien adaptées aux colis primaires et sont compactes.

Les études de concepts innovants mettent en avant diverses approches d'architecture et de mode de manutention. Chacune d'elles n'offre pas à elle seule, une polyvalence optimale vis-à-vis de la diversité des colis primaires et de stockage, mais répond bien à une gamme relativement large de colis primaires ou de stockage.

Tableau 7.6-1 Comparaison entre options de conception d'installations d'entreposage de colis de déchets MAVL existantes et novatrices

	Robustesse des fonctions de sûreté	Accessibilité des colis	Polyvalence	Aptitude à la durabilité	Modularité
Installations existantes					
ECC – Entreposage des coques compactées – La Hague	+++	+++	+	+++	++
CEDRA MI – Cadarache	+++	+	+	+++	++
Etudes de faisabilité présentées au chapitre 7					
Entrepôt avec transstockeur en surface	+++	+++	+++	+++	++
Entrepôt avec longrines et navettes en surface	+++	+	+++	+++	++
Entrepôt à faible profondeur	+++	+++	+++	+++	++

La question du **choix entre une implantation en surface ou à faible profondeur** se pose de la même façon que pour les déchets HA, les travaux en souterrain sont plus coûteux qu'en surface, et comportent plus d'aléas.

Si la question du refroidissement est moins problématique que pour les déchets HA, celle de la gestion de l'eau souterraine s'applique aussi. Une installation à faible profondeur sera plus complexe.

Ici encore la durabilité à l'échelle séculaire ne permet pas de départager une implantation en surface ou à faible profondeur.

Hormis la question éventuelle de l'impact sur le paysage, l'implantation d'un entreposage à faible profondeur ne constitue pas une réponse aux besoins exprimés au chapitre 5 pour les déchets MAVL.

L'Andra a donc proposé en 2009 de ne pas poursuivre l'étude d'installations d'entreposage de colis de déchets MAVL à faible profondeur, tout en laissant ouverte la possibilité d'ouvrages semi-enterrés construits à ciel ouvert.

7.6.2 Axes d'optimisation explorés dans le cadre de la seconde phase, données d'entrée

L'entreposage en surface avec transstockeur et rayonnages apparaît bien adapté aux colis primaires MAVL dont la masse est inférieure à 1 000 kg. Il bénéficie d'un important retour d'expérience dans l'industrie non nucléaire. Il est compact et facilite la surveillance des colis par une plus grande accessibilité.

La construction en hauteur ne favorise pas la gestion des risques sismique et de chute de colis.

L'entreposage avec longrines et navette en surface présente une polyvalence et une modularité qui répondent aux besoins d'un entreposage tampon de petite capacité aussi bien qu'à ceux d'un entreposage d'attente ou d'appui à la réversibilité.

Cependant le système de longrines mobiles ne bénéficie pas de retour d'expérience industriel. Il est a priori difficile à réparer ou à remplacer sur le long terme. L'empilement serré des colis complexifie la surveillance des colis et de l'installation.

Le second concept a été privilégié dans son principe pour la deuxième phase d'études, en axant la recherche d'optimisation sur :

- la surveillance du vieillissement des installations d'entreposage et des colis, ces derniers étant considérés isolément ou par lots destinés à être stockés dans le même type d'alvéole (mesure de la puissance thermique de l'ensemble des colis entreposés, mesure de leur dégagement éventuel de gaz radioactifs[209], mesure de leur production éventuelle de gaz[210] par radiolyse) ;
- le système de manutention, en s'inspirant notamment de celui proposé dans le concept d'entreposage à faible profondeur présenté à la section 7.5.

Comme pour les déchets HA, le nombre et la capacité des modules d'entreposage, les flux d'entrée / sortie et les caractéristiques hypothétiques de site à prendre en compte dans la seconde phase ont été redéfinis (tableau suivant).

Tableau 7.6-2 Hypothèses des études d'optimisation du concept d'entreposage de colis MAVL

Type de site d'implantation (voir ci-dessous)	2	1	3	3
Flux d'entrée/sortie (en m3 par an)	2 500	2 500	2 500	2 500
Capacité d'un module (m3)	600	5 000	5 000	5 000
Nombre maximal de modules	10	5	3	3
Type d'entreposage	Tampon Récupération	Tampon Attente Récupération	Tampon Attente Récupération	Tampon Attente Récupération
Durée d'exploitation (en années)	100	100	100	100

Typologie des conditions de sites situés en France métropolitaine :

-Type 1 : site littoral océanique à séismicité moyenne

-Type 2 : site continental, à climat froid et séismicité faible

-Type 3 : site continental, à climat méditerranéen et à séismicité forte

7.7 Les évolutions possibles du concept d'entreposage MAVL dans une optique d'optimisation

Cette section décrit le concept d'entreposage ressortant au final de la deuxième phase d'études. En contrepartie des améliorations apportées, la compacité de l'entreposage a été diminuée, impliquant une plus grande emprise au sol. Cependant le concept développé peut être adapté à une installation sur plusieurs niveaux à l'image d'ECC.

[209] tritium, carbone 14, chlore 36, Argon 39, krypton 85, iode 129, radon 222
[210] hydrogène, hydrocarbures

7.7.1 Le cloisonnement en alvéoles ventilés

Dans la continuité des études précédentes, les colis de déchets primaires sont regroupés dans des casiers à base carrée, en nombre variable : 4, 2 ou 1 suivant leur masse et leurs dimensions. Les casiers de colis primaires ou les colis de stockage sont pré-empilés sur un maximum de deux niveaux puis disposés sur une navette équipée d'une fourche télescopique.

Les halls d'entreposage d'une longueur approximative de 100 mètres, d'une largeur de 25 mètres et d'une hauteur de 5 mètres, sont des structures en béton armé de grande épaisseur assurant la radioprotection et desservies par un couloir placé entre les halls et lui-même blindé. L'ensemble des systèmes de manutention, de ventilation et de surveillance sont télé-opérés. Les halls sont divisés en alvéoles avec porte blindée et cloison de séparation pare-feu. Ils peuvent être ventilés mécaniquement si une mesure des relâchements de gaz de radiolyse ou de gaz radioactifs est effectuée, ou si la puissance thermique des colis de déchets MAVL le nécessite. Le cas échéant, la ventilation mécanique de chaque alvéole est débrayable pour lui substituer une ventilation naturelle.

Les casiers gerbés sur deux niveaux au plus sont déposés sur le radier des alvéoles en deux rangées disposées de part et d'autre d'une allée centrale. Les radiers sont recouverts de dalles « fusibles », qui pourront être enlevées une à une lors du démantèlement (en cas de contamination). La déconstruction de la structure en béton armé pourra ensuite être réalisée dans un environnement dénucléarisé.

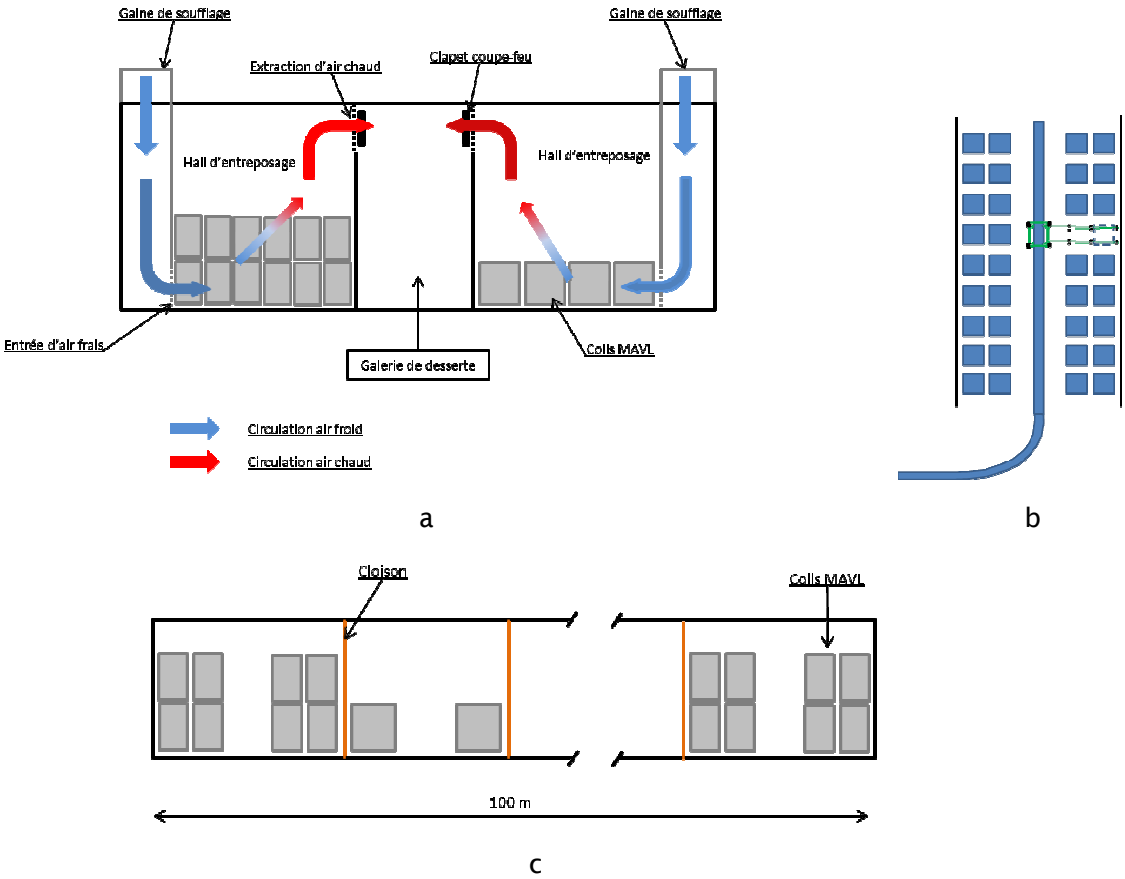


Figure 7.7-1 Hall d'entreposage du concept MAVL optimisé

(a) coupe transversale des deux halls de part et d'autre de la galerie par laquelle l'air soufflé par les gaines est extrait
(b) dessin en plan d'une alvéole cloisonnée d'un hall d'entreposage
(c) coupe longitudinale d'un hall d'entreposage fractionné en alvéoles cloisonnées

7.7.2 La manutention par navette plate équipée d'une fourche télescopique

La navette peut transporter des charges d'une masse de 25 tonnes (deux colis de stockage de colis CSD-C). Elle se déplace sur rouleurs en acier. Un monorail assure le guidage et l'alimentation électrique par secteur géographique. Les chargements et déchargements sont effectués par une fourche télescopique dont l'écartement est réglable et qui est schématisée sur la figure suivante. L'orientation à droite ou à gauche de cette fourche est préréglée après le chargement par pivotement de la navette sur une plate-forme tournante.

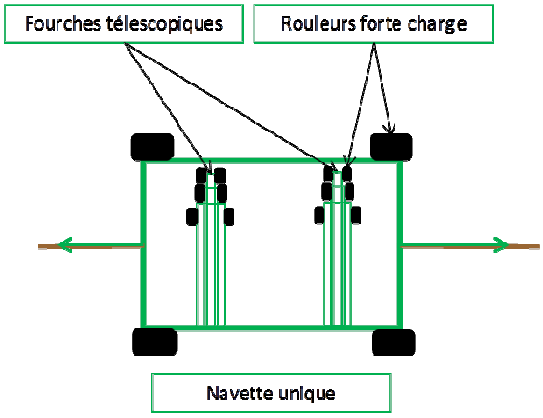


Figure 7.7-2 *Schéma de la navette de manutention des colis avec la fourche télescopique.*

La figure ci-après montre les 4 phases d'une opération de chargement d'un empilement de colis, la mise en place dans l'alvéole d'entreposage s'effectuant par l'enchaînement inverse de ces 4 phases.

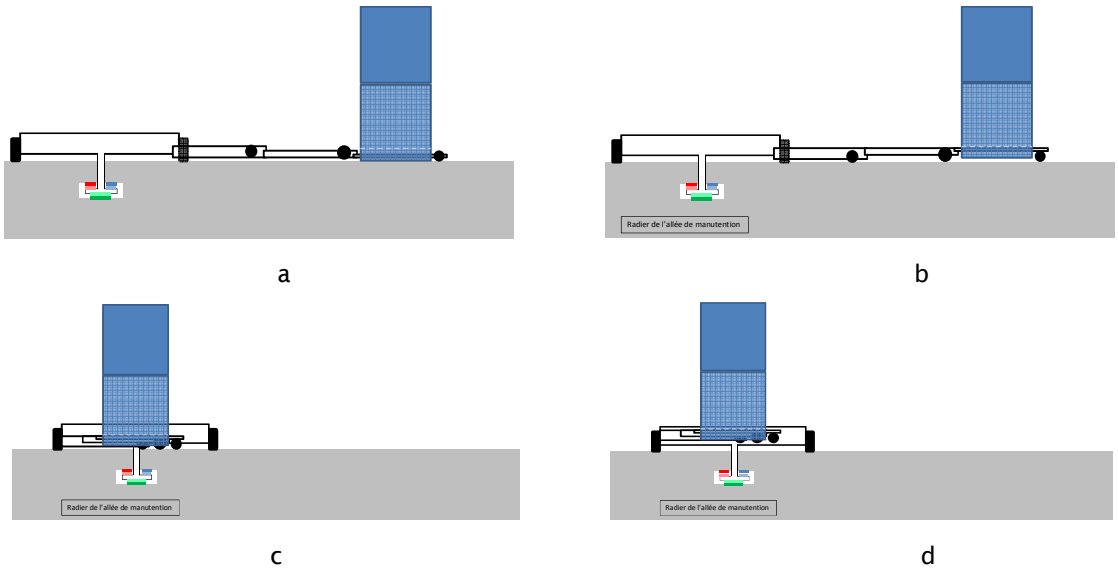


Figure 7.7-3 *Les phases de chargement d'un empilement de casiers de colis primaires ou de colis de stockage par la navette munie d'une fourche télescopique*

(a) Les fourches se déploient suspendues, les rouleurs étant relevés
(b) Les colis reposent sur les fourches qui reposent sur leurs rouleurs,
(c) Les fourches se rétractent sur leurs rouleurs et amènent les colis sur la navette
(d) Les fourches sont soulevées, la charge est supportée par la navette qui peut se déplacer

En cas d'application du concept à un bâtiment à plusieurs étages, un monte-charge permettrait d'amener la navette au droit de chacun d'entre eux.

7.7.3 L'amélioration de la polyvalence de l'entreposage

Le système de manutention et les alvéoles d'entreposage peuvent recevoir simultanément des colis primaires et/ou de stockage de caractéristiques différentes sans limitation du fait de leur masse ou de leurs dimensions.

7.7.4 L'amélioration des possibilités de surveillance

Le cloisonnement des halls d'entreposage permet de mettre en place sur un alvéole dans lequel seraient entreposés des colis de caractéristiques similaires, des mesures des relâchements de gaz de radiolyse et/ou de gaz radioactifs.

Un système de mesure de la composition de l'air par prélèvement d'échantillons pourrait mesurer la teneur de ces gaz à l'état de trace. Par ailleurs le système de ventilation mécanique permet de quantifier les débits d'air qui circulent dans l'alvéole. De ces informations il est possible de déduire les relâchements de l'ensemble des colis entreposés. La figure suivante représente le schéma de principe d'un système de mesure de ce type qui pourrait surveiller simultanément plusieurs alvéoles d'entreposage.

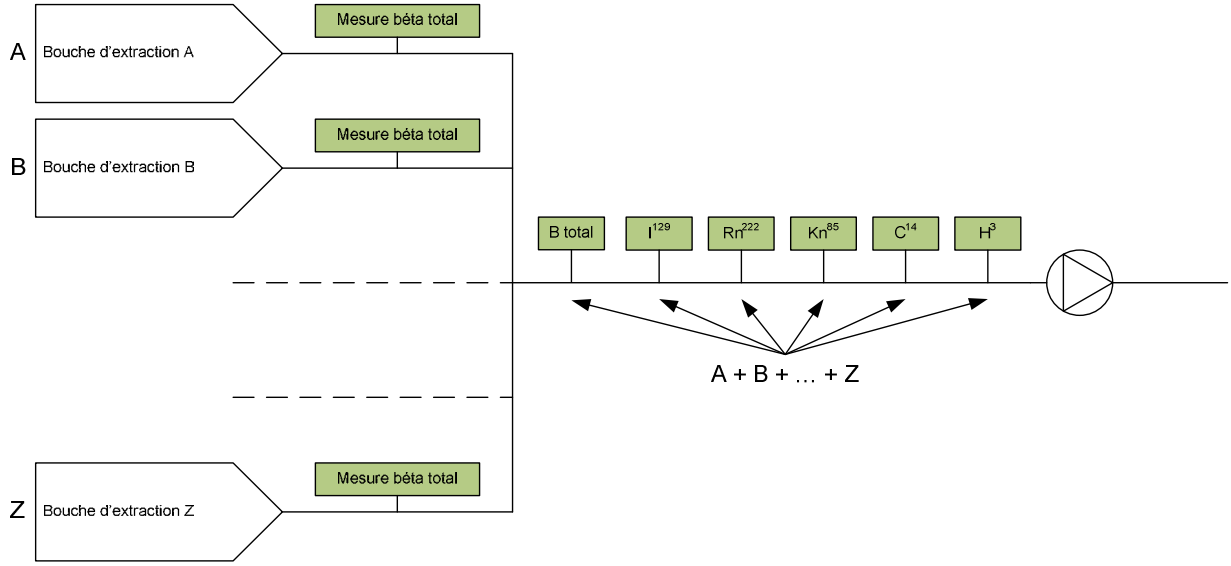


Figure 7.7-4 Disposition des systèmes d'analyse de la composition radioactive (ou chimique) de l'air extrait des alvéoles d'entreposage MAVL

Des systèmes de mesure et de surveillance peuvent être montés sur la navette de manutention ou sur une navette spécialisée. L'objectif est de s'approcher des colis et d'effectuer des mesures à leur proximité.

La figure suivante montre une cloche de mesure qui permettrait, sur un colis particulier de déchets MAVL conditionnés en fûts en acier, d'effectuer une série de mesures englobant le dégazage, la puissance thermique et des contrôles de la profondeur de la corrosion.

Ce système pourrait être mis en place sur le colis dans sa position d'entreposage grâce à une navette de transport, à condition que le placement en casier des colis ait été conçu de manière adaptée.

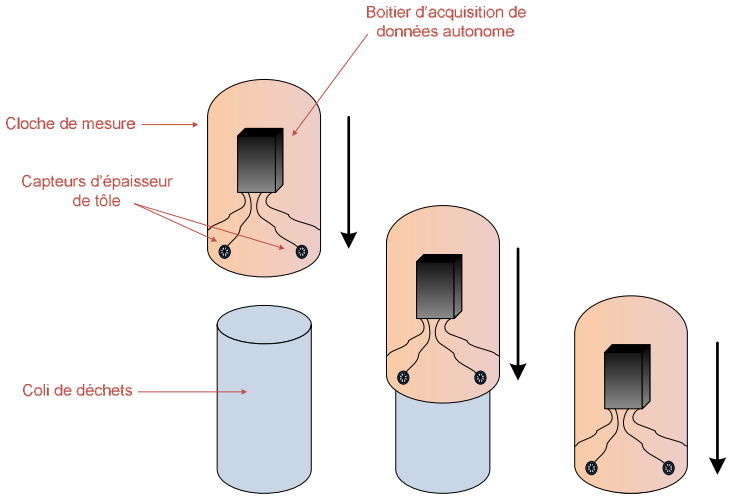


Figure 7.7-5 *Cloche de mesure multi-paramètres des colis de déchets MAVL en fût métallique pour une surveillance en position d'entreposage*

8

Analyse phénoménologique de l'entreposage, optimisation du choix des matériaux et des dispositions constructives

8.1 Données d'entrée de l'analyse phénoménologique 296

8.2 La conceptualisation phénoménologique d'une installation d'entreposage 299

8.3 Les grands processus 305

8.4 Principaux éléments déterminant l'évolution phénoménologique des entreposages 313

Les études et recherches sur l'entreposage de colis de déchets HA et MAVL visent à pouvoir conserver ces colis jusqu'à une durée séculaire en préservant leur intégrité et en garantissant la sûreté des travailleurs et de l'environnement. La conception et l'évaluation de sûreté et de durabilité d'installations d'entreposage impliquent la compréhension de leur fonctionnement phénoménologique ainsi que celui de leur environnement.

Fort de son retour d'expérience sur le stockage, l'Andra a souhaité effectuer une analyse phénoménologique de l'entreposage des colis de déchets HA et MAVL. Comme l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), l'analyse phénoménologique de l'entreposage a pour objet d'identifier de manière aussi complète que possible et au regard des connaissances scientifiques et technologiques du moment, l'ensemble des phénomènes thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques (THMCR) les plus probables de l'évolution d'un entreposage et de son milieu naturel environnant, depuis la construction et tout au long de l'exploitation.

Comme l'APSS, l'analyse phénoménologique est construite autour d'une segmentation temps/espace de la construction et de l'exploitation d'un entreposage, sur la base d'une décomposition matérielle et chronologique de l'entreposage. Chaque situation est une unité élémentaire et correspond à un état phénoménologique THMCR d'une partie de l'entreposage ou de son environnement naturel depuis un temps donné et sur une durée donnée de la vie de l'entreposage. Cette segmentation est rendue possible par la différence entre les temps caractéristiques des différents phénomènes THMCR mis en jeu.

L'analyse phénoménologique consiste ainsi à décrire et quantifier, pour chaque situation, les processus THMCR ainsi que leurs couplages qui affectent les composants des ouvrages et le milieu environnant. Elle s'attache particulièrement à identifier les temps caractéristiques et les extensions spatio-temporelles des processus.

L'Andra a effectué cette analyse phénoménologique de manière générique vis-à-vis de la conception des installations et de leur site d'implantation, en s'appuyant sur quelques configurations représentatives. Elle aboutit à des recommandations générales en matière de choix des matériaux et de dispositions constructives favorables au maintien de conditions d'environnement favorables à la durabilité des structures d'entreposages et des colis de déchets.

L'analyse phénoménologique établit une conceptualisation simple de l'entreposage en termes de sollicitations phénoménologiques, de dispositions de conception et de composants de l'entreposage et met en exergue les grands déterminants phénoménologiques. Elle a tiré parti de la conception et du retour d'expérience des installations d'entreposage existantes (chapitre 3), des recherches menées par le CEA dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 ainsi que du corpus de connaissances développées pour le stockage en formation géologique profonde.

8.1 Données d'entrée de l'analyse phénoménologique

8.1.1 Arborescence matérielle de l'entreposage

En plus des ouvrages, en surface ou en faible profondeur, l'analyse phénoménologique d'une installation d'entreposage doit prendre en compte le sol et le milieu géologique qui accueillent ces ouvrages et l'environnement de surface.

Les ouvrages d'entreposage peuvent être déclinés en plusieurs sous-niveaux d'arborescence en fonction du niveau de détail de la définition des composants de l'installation.

Le premier sous-niveau distingue en particulier le hall (ou fosse, ou galerie) d'entreposage accueillant les colis de déchets, la ventilation et les composants annexes (bâtiments). La Figure 8.1-1 donne, à titre d'exemple, une décomposition matérielle des ouvrages d'entreposage de E-EV-SE à La Hague.

8.1.2 Chronogramme d'exploitation

Le cycle de vie de l'installation d'entreposage comprend une succession d'étapes (Tableau 8.1-1).

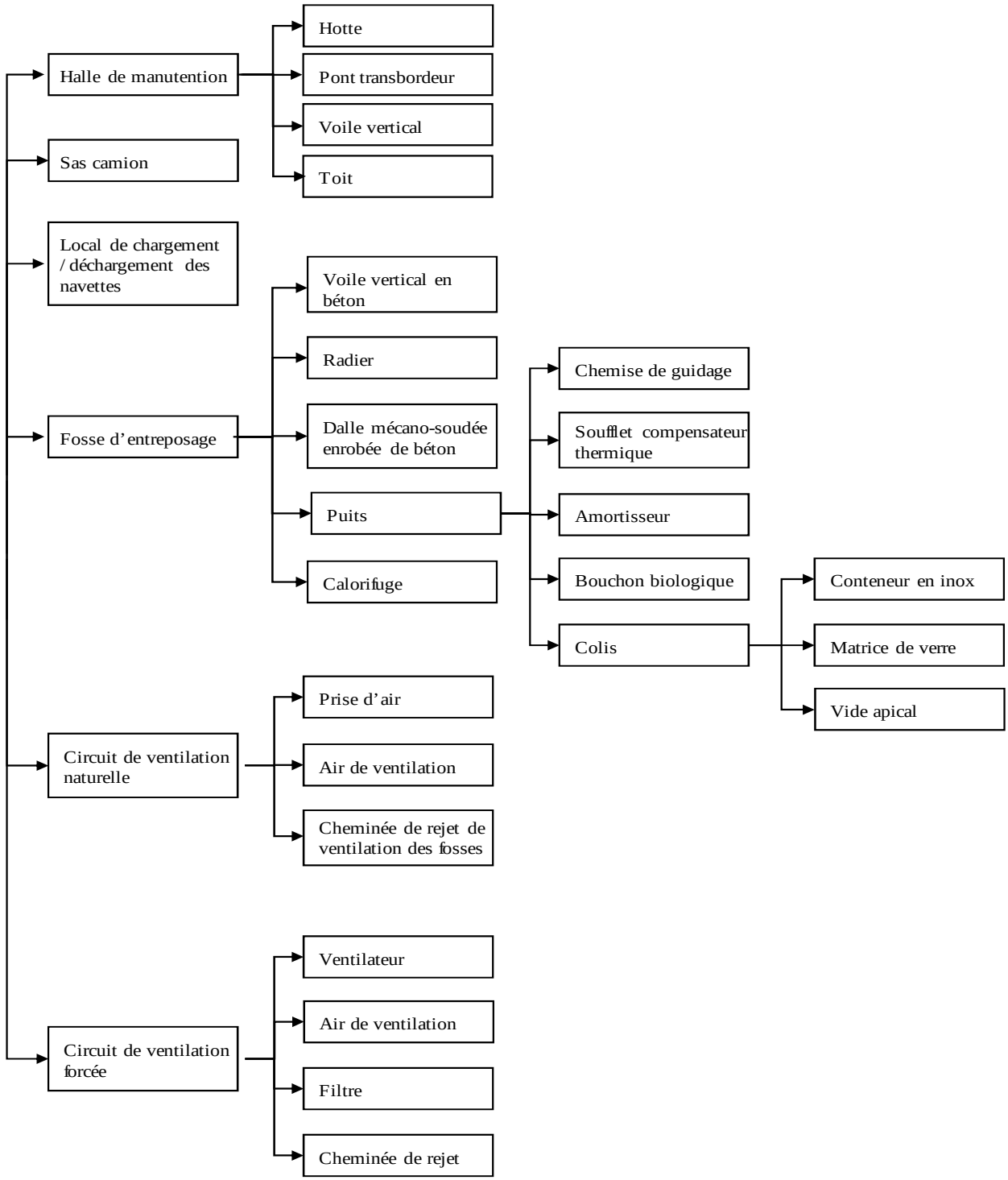


Figure 8.1-1 Exemple d'arborescence matérielle simplifiée relative à l'installation E-EV-SE sur le site de la Hague

Tableau 8.1-1 Les grandes étapes du processus d'entreposage

ETAPE	SIGNIFICATION
Etape 0	Etat initial (environnements hôtes de surface et géologique)
Etape 1	Terrassement / construction
Etape 2	Chargement de l'installation
Etape 3	Attente en pleine capacité
Etape 4	Déchargement
Etape 5	Mise à l'arrêt définitif / démantèlement

L'évolution des ouvrages est déterminée par ces étapes. Elle est décrite selon la séquence suivante, identifiant les situations à analyser :

- L'état initial (étape 0) de la zone destinée à devenir une installation d'entreposage, avant la réalisation de l'ouvrage ;
- La phase de terrassement et d'aménagement des ouvrages d'entreposage (étape 1) ;
- La phase de chargement progressif des colis de déchets dans l'ouvrage (étape 2) : elle comprend les opérations de conditionnement éventuel et de transfert en zone d'entreposage. L'activité dans l'entreposage s'amorce progressivement avec le remplissage de l'installation. Selon les capacités d'entreposage et des flux de production des colis, cette phase peut durer de quelques années à quelques dizaines d'années ;
- La phase d'entreposage en pleine charge (étape 3) : les fonctions de sûreté sont maintenues et surveillées, notamment l'évacuation de la chaleur dans le cas d'un entreposage de décroissance thermique[211] ; cette phase peut aussi être caractérisée par un flux continu d'arrivée et de départ de colis. Sa durée est de l'ordre de plusieurs dizaines d'années ;
- La phase de déchargement progressif des colis (étape 4) de l'installation suivant le schéma inverse de l'étape 2.
- La phase de mise à l'arrêt définitif puis de démantèlement par la mise en œuvre de techniques de déconstruction

L'analyse s'est focalisée sur les trois grandes étapes d'utilisation de l'installation : 2, 3 et 4.

8.1.3 Les colis de déchets analysés

L'analyse s'est appuyée sur des colis particulièrement représentatifs vis-à-vis des processus phénoménologiques mis en jeu dans un entreposage à savoir la production éventuelle d'hydrogène, le dégagement de chaleur et les phénomènes radiologiques.

[211] Pour mémoire, les fonctions de sûreté d'une installation d'entreposage sont -la protection des opérateurs et du public vis-à-vis de l'irradiation externe, -le confinement des substances radioactives contenues dans les déchets, l'évacuation de la chaleur dégagée par les déchets (cela concerne principalement les déchets HA, ainsi que les déchets MAVL les plus actifs), l'évacuation des gaz de radiolyse (notamment l'hydrogène généré par certains déchets MAVL), la sûreté-criticité (lorsque les déchets entreposés contiennent une quantité significative de radionucléides fissiles).

Il s'agit :

- des colis primaires de déchets HA vitrifiés de la famille F1-3-01 (CSD-V) ;
- des colis primaires MAVL faiblement exothermiques de la famille F2-3-02 (CSD-C) ;
- des colis primaires d'enrobés bitumineux MAVL des familles F2-3-04, F2-4-03 6, F2-4-04.

8.2 La conceptualisation phénoménologique d'une installation d'entreposage

En terme de fonctionnement phénoménologique, le système formé de l'installation d'entreposage et de son environnement apparait comme (i) un système complexe par la diversité des composants et des sollicitations phénoménologiques, et (ii) un système spécifique des options techniques mises en œuvre et du site (environnement géologique et atmosphérique). En effet, hors les colis de déchets, un entreposage se présente comme un ensemble de bâtiments/locaux de natures différentes (composants en béton et/ou métalliques), plus ou moins connectés entre eux (indépendants phénoménologiquement ou interagissant directement ou indirectement entre eux) et aux fonctions spécifiques. Les sollicitations sont variées, thermique (dégagement de chaleur des déchets HA), hydraulique (la pluie, ou l'hygrométrie de l'air de ventilation par exemple), mécanique (par exemple la réponse thermomécanique des structures en béton ou métalliques au dégagement de chaleur des déchets HA), chimiques (par exemple la carbonatation atmosphérique des composants en béton soumis à l'air de ventilation et/ou l'atmosphère externe), et radiologiques (par exemple le rayonnement externe émis par les colis de déchets).

De manière générique, le système et les sollicitations phénoménologiques peuvent être décrits selon un schéma structurel et fonctionnel simple, qui donne une représentation synthétique et globale du fonctionnement phénoménologique d'un entreposage.

En outre, ce schéma est renforcé par l'adoption de principes et de dispositions de conception *ad-hoc* visant à conforter la robustesse et la durabilité d'un tel système, en fonctionnement normal et en fonctionnement accidentel : favoriser la stabilité intrinsèque des ouvrages, et minimiser les interactions phénoménologiques entre l'installation et son environnement externe (atmosphère, milieu géologique) et au sein de l'installation, notamment les colis de déchets.

En pratique, il s'agit :

- de maintenir les colis dans des conditions physico-chimiques stables et favorables à leur durabilité, afin de les conserver en l'état et d'assurer le confinement des radionucléides ;
- d'évacuer la puissance thermique résiduelle ou l'hydrogène de radiolyse ;
- d'assurer la mise en place et le retrait des colis par des moyens simples et si possible identiques ;
- d'adopter des dispositions constructives de génie civil répondant aux spécifications fonctionnelles en lien avec la durabilité séculaire et la sécurité des ouvrages.

8.2.1 Les deux types de sollicitations phénoménologiques

On distingue deux types de sollicitations, celles externes liées à l'environnement naturel et celles internes liées aux composants de l'entreposage.

8.2.2 Les sollicitations externes

Les sollicitations externes correspondent aux sollicitations des deux composants de l'environnement naturel, l'atmosphère et le milieu géologique.

<u>Sollicitations par l'atmosphère</u>

L'atmosphère impose en premier lieu des sollicitations thermiques (rayonnement solaire, température de l'air atmosphérique, températures de l'eau vapeur de l'air atmosphérique ou de la pluie). Ces sollicitations sont cycliques suivant des cycles journaliers et saisonniers.

A cela, il convient d'ajouter des sollicitations chimiques (polluants atmosphériques, chlorures, chimie de l'eau de pluie, dioxyde de carbone…), puis, dans une moindre mesure, des sollicitations mécaniques directes (force du vent) ou indirectes (par exemple les effets mécaniques liées à la thermique, comme les cycles de gel/dégel de l'eau porale des bétons ou les contraintes thermomécaniques sous l'effet des variations cycliques de température de l'air atmosphérique).

Comme cela sera détaillé plus loin, des dispositions de conception courantes pour les ouvrages de génie civil peuvent être adoptées pour limiter ou empêcher les sollicitations atmosphériques : échauffement de surface, humidité atmosphérique, pluie etc.

Sollicitations par le milieu géologique

Le milieu géologique génère des sollicitations hydrauliques et mécaniques. Pour une implantation des ouvrages en surface, cela concerne essentiellement les interactions mécaniques sol/radier.

En effet, sur le plan hydraulique, les règles et les dispositions de construction courantes d'un ouvrage de génie civil concourent à limiter ou empêcher les interactions (construction hors nappe, système de drainage des eaux…; voir infra, § 8.2.4). Pour une implantation en faible profondeur, les interactions mécaniques sont les contraintes exercées par le milieu géologique sur les soutènements/revêtements : elles restent limitées du fait de la faible profondeur. Comme pour l'entreposage en surface, le choix du site (par exemple des calcaires compacts) et les dispositions de conception courantes concourent à limiter ou empêcher les sollicitations hydrauliques.

De manière générale, la limitation des sollicitations hydrauliques du milieu géologique conduit *de facto* à une limitation des sollicitations chimiques, l'eau étant un réactif chimique ou le vecteur des réactifs chimiques (par exemple la carbonatation sous eau des bétons).

8.2.3 Les sollicitations internes

Les sollicitations internes des ouvrages d'entreposage sont issues des colis de déchets et de l'air de ventilation.

Sollicitations par les déchets et les colis de déchets

Les sollicitations par les colis de déchets sont essentiellement de deux natures :

- le dégagement de chaleur des colis fortement/ moyennement exothermiques (colis HA) ou faiblement exothermiques (certains colis MAVL) ;
- les rayonnements ionisants.

Les déchets radioactifs émettent des rayonnements ionisants. Suivant leur nature, ces rayonnements sont localisés au niveau des déchets et du colis de déchets (cas du rayonnement α) ou sont émis hors du colis de déchets (cas du rayonnement β/γ). Ils peuvent alors interagir avec d'autres composants, notamment l'air de ventilation, les composants de structure en béton ou les structures métalliques (par exemple les chemises de guidage de la fosse d'E-EV-SE à La Hague). Le Tableau 8.2-1 donne à titre d'exemple l'évolution temporelle du débit de dose autour d'un CSD-V en différents points. Il souligne le fait que la distance d'interaction des rayonnements est limitée.

Tableau 8.2-1 Débit de dose (Gy.h^{-1}) au contact d'un CSD-Ventre 1 an et 100 ans sur le dessus, le dessous, les côtés du colis après fabrication

Débit de dose (Gy/h)	1 an	10 ans	60 ans	100 ans	130 ans	150 ans
à 5 cm - Latéral	$1,1\times10^{3}$	$6,7\times10^{2}$	$1,9\times10^{2}$	$9,0\times10^{1}$	$4,5\times10^{1}$	$2,8\times10^{1}$
à 5 cm - Dessus	$3,7\times10^{2}$	$2,3\times10^{2}$	$6,7\times10^{1}$	$3,0\times10^{1}$	$1,5\times10^{1}$	9,4
à 5 cm - Dessous	$1,3\times10^{3}$	$8,0\times10^{2}$	$2,3\times10^{2}$	$1,1\times10^{2}$	$5,3\times10^{1}$	$3,3\times10^{1}$
à 1 m - Latéral	$1,0\times10^{2}$	$6,4\times10^{1}$	$1,8\times10^{1}$	8,5	4,3	2,7
à 1 m - Dessus	$3,1\times10^{1}$	$2,0\times10^{1}$	5,6	2,6	1,3	$8,1\times10^{-1}$
à 1 m - Dessous	$4,3\times10^{1}$	$2,6\times10^{1}$	7,6	3,6	1,8	1,1

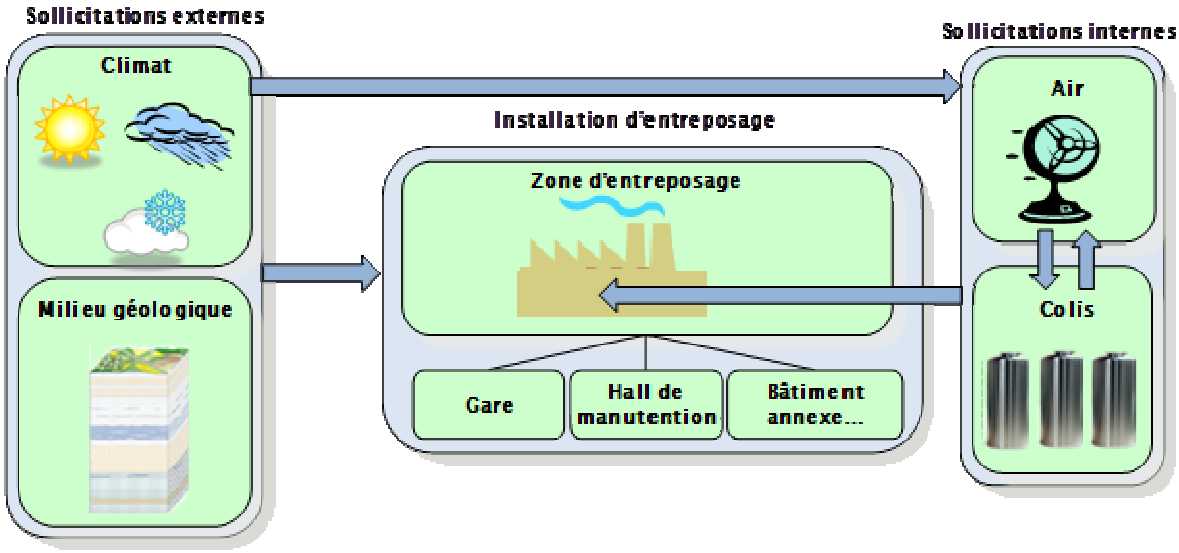


Figure 8.2-1 Les sollicitations d'une installation d'entreposage dans son environnement

<u>Sollicitations par l'air de ventilation</u>

L'air de ventilation est un composant majeur dans la mesure où il intervient de manière transverse entre l'environnement extérieur (atmosphère) et l'entreposage. Il est le vecteur :

- des échanges thermiques (dissipation par convection via la ventilation, qu'elle soit naturelle ou forcée) ;
- des interactions entre composants internes (exemple des composants situés en aval des colis par rapport au sens de circulation de l'air et sont impactés par la chaleur évacuée par la ventilation) ;
- d'interactions éventuelles entre le milieu externe (d'où l'air provient) et le milieu interne (où il subit des échanges, thermiques notamment).

8.2.4 Dispositions de conception favorables à la limitation des sollicitations phénoménologiques, donc à la durabilité de l'entreposage

La durabilité des composants d'un entreposage (incluant les colis de déchets) sur une durée d'ordre séculaire de l'exploitation peut être favorisée par des dispositions de conception particulières, d'ores et déjà mises en œuvre industriellement en France et à l'étranger.

Il s'agit en fonctionnement normal et en fonctionnement accidentel, d'empêcher ou limiter tout ou partie des sollicitations internes et externe, et plus particulièrement d'imposer des conditions d'environnement internes globalement constantes et favorables à la durabilité des colis et des composants de structure. Ces dispositions favorisent ainsi la maîtrise du fonctionnement et de l'évolution phénoménologique de l'entreposage.

En pratique, elles concernent le dimensionnement ou la composition physico-chimique des composants qui, *de facto,* peut limiter l'extension et l'amplitude des sollicitations ou des processus.

Ouvrages de structure

Des ouvrages de structure externes protégés de l'eau du milieu environnant

L'installation d'entreposage est potentiellement exposée à des sollicitations aqueuses et chimiques venant de l'atmosphérique et/ou du milieu géologique, par exemple les précipitations, l'hygrométrie de l'air atmosphérique, les eaux de surface ou les eaux des aquifères de surface. Des dispositions de conception permettent d'éviter ou de limiter le contact avec l'eau liquide. Par exemple, pour les concepts en surface, les ouvrages sont construits au-dessus du niveau de la nappe phréatique (incluant les crues et les pluies exceptionnelles) ou à défaut, un rabattement de la nappe et un drainage des eaux est mis en place. De même la présence d'un bardage extérieur limite ou empêche le ruissèlement de l'eau sur les structures en béton.

Des ouvrages de structure en béton aux caractéristiques intrinsèquement durables

Les structures en béton qui constituent le gros œuvre intègrent des spécifications adaptées à la durée de vie séculaire visée :

- un choix préférentiel de ciment à chaleur d'hydratation modérée pour les structures en béton armé de forte épaisseur de façon à réduire le retrait thermique à la prise et l'apparition de microfissuration de dessiccation ;
- des durées de cure longue des bétons et une mise en place des parois verticales par plots alternés pour minimiser la fissuration au droit des joints de reprise de bétonnage ;
- des formulations de béton limitant la pénétration d'agents chimiques (eau et gaz carbonique notamment) catalyseurs des cinétiques de dégradation chimique (carbonatations atmosphérique et sous eau), et utilisant des granulats non réactifs (absence d'alkali réaction) ;
- des épaisseurs d'enrobage des armatures permettant de maintenir ces dernières dans un mode de corrosion passif, en lien avec les formulations de béton ;
- une protection thermique (calorifuge) des structures permettant de limiter les sollicitations thermomécaniques (températures limitées, faibles gradients de température) d'origine externe ou interne (cf. § 8.2.1).

Des ouvrages de structure dimensionnés pour résister aux aléas

En lien avec les exigences règlementaires, la conception des entreposages intègre des critères de dimensionnement permettant de répondre aux aléas externes, types séisme, chute d'avion, ou conditions climatiques extrêmes (vent, précipitation).

Des composants métalliques de structure en alliages ou métaux passivables

Comme pour les bétons, en lien avec l'hygrométrie au sein de l'entreposage, la conception des composants métalliques de structure privilégie l'emploi d'alliages ou métaux passivables, majoritairement de type acier inoxydable, et si nécessaire titane, afin de limiter la corrosion en fonctionnement normal et en fonctionnement accidentel.

Ventilation

Un air de ventilation à une humidité relative faible et constante

L'état hydrique de l'installation, et en particulier l'hygrométrie de l'air de ventilation à l'intérieur de l'installation d'entreposage, sont des facteurs clés des processus de dégradation chimique (et par voie de conséquence mécanique) des composants métalliques et cimentaires (corrosion, carbonatation atmosphérique…). Cela concerne aussi certains déchets ou matrices de déchets MAVL autres que du béton ou des métaux, par exemple les boues bitumées pour lesquelles le contact avec l'eau liquide peut entraîner une reprise d'eau avec relâchement de radionucléides et de sels agressifs.

Une humidité relative de l'air de ventilation, suffisamment faible et constante (absence de cycles), favorise l'absence ou la limitation des processus de dégradation chimique cités ci-dessus. Ceci peut être obtenu de manière active, par un système de préchauffage et/ou de recyclage de l'air de ventilation en amont du circuit de ventilation, dans le cas de l'entreposage des colis faiblement exothermiques ou athermiques (MAVL), ou de manière passive (intrinsèque) dans le cas de l'entreposage des colis HA du fait de leur dégagement thermique.

Une évacuation du dégagement thermique des colis HA et des colis MAVL faiblement exothermiques

La chaleur émise par les colis HA et les colis MAVL faiblement exothermiques peut entraîner indirectement des sollicitations mécanique et chimique sur les colis eux-mêmes et sur les autres composants de l'entreposage, nonobstant une dégradation des conditions de travail dans les locaux accessibles aux opérateurs au sein de l'entreposage. La conception du dispositif de ventilation vise à évacuer le maximum de chaleur émise et ainsi à maintenir les températures et les gradients de température au sein de l'entreposage dans des domaines garantissant la sûreté de l'installation en fonctionnement normal et en fonctionnement accidentel, et sa durabilité.

La charge thermique de l'installation est pilotée par la puissance thermique des colis et les modalités de son évacuation sont variables :

- dans le temps en fonction de la décroissance radioactive des déchets (phases de chargement/déchargement,) et des conditions externes (température de l'air variable selon les cycles journaliers et saisonniers) ;
- dans l'espace en fonction de sa géométrie en lien avec échanges internes (débit, surface d'échange, pertes de charge…) et des phases d'exploitation (chargement/déchargement).

Dans le cas des colis HA, l'évacuation de la chaleur peut être obtenue *de facto* de manière passive par thermosiphon.

Le principal enjeu de conception consiste alors à garantir des niveaux de température inférieurs aux seuils spécifiés dans l'espace (absence de points chaud) et dans le temps sur toute la durée de vie de l'installation, par la mise en œuvre :

- de dispositions de dimensionnement influant sur le débit de ventilation (hauteur de la cheminée, géométrie du circuit aéraulique) ;
- de dispositions permettant d'adapter le débit de ventilation dans le temps (en lien avec la décroissance thermique des colis) soit en influant sur les termes moteurs (puissance de ventilateurs), soit en en influant sur le réseau de perte de charge (registres) ;
- de dispositions spécifiques de protection des composants (protection des bétons par un calorifuge par exemple).

Dans le cas de colis de déchets MAVL faiblement exothermiques, la ventilation forcée est généralement préférée afin (i) de contrôler l'atmosphère interne pour protéger les colis de la corrosion, (ii) évacuer la puissance thermique résiduelle et (iii) diluer et évacuer les gaz de radiolyse et les gaz radioactifs (cf. ci-après). Une ventilation forcée ouvre la possibilité d'une filtration de l'air avant rejet.

Une évacuation de l'hydrogène issu de déchets MAVL

Certains déchets MAVL, comme les colis de boues bitumées, produisent de l'hydrogène par radiolyse de la matière organique qu'ils contiennent, qui constitue avec l'oxygène de l'air un mélange explosif. Afin de se prémunir de conditions d'atmosphère explosives (ATEx), la conception des installations intègre deux types de mesure :

- la ventilation : elle permet de diluer et d'évacuer l'hydrogène produit de telle sorte que la concentration ne dépasse pas les seuils admis. En cas d'arrêt prolongé de la ventilation, certaines installations existantes intègrent un dispositif de fonctionnement par tirage naturel (cas de l'installation ECC) ;
- l'absence de secteurs pouvant constituer des zones mortes (boucles de recirculation, zones non ventilées…) dans lesquels l'air ne serait pas renouvelé autorisant ainsi une accumulation localisée d'hydrogène.

L'imposition d'un air de ventilation dénué de polluants

Les dispositions de ventilation permettent de garantir des conditions d'hygrométrie sèches, et globalement constantes. Combinées aux dispositions de conception des ouvrages de structure, elles contribuent à des conditions d'environnement internes découplées (*i.e.* indépendantes) des sollicitations externes.

Il n'est pas exclu que, dans des situations particulières, des processus de condensation d'eau affectent néanmoins la surface de certains composants métalliques. Dans ce cas, et afin de s'affranchir des processus de corrosion localisée, une filtration de l'air de ventilation en amont du circuit de ventilation avec élimination des polluants potentiellement agressifs et de leur éventuelle accumulation, est une disposition de conception complémentaire qui contribue à imposer des conditions physico-chimiques minimisant les cinétiques de corrosion. Cela concerne en particulier les chlorures (issus du salage des routes, des embruns salins en site côtier…) et le dioxyde de souffre SO_2 qui peuvent être des catalyseurs de la corrosion[212].

8.2.5 Les ouvrages, les composants (hors colis) et les matériaux majeurs de l'entreposage vus sous l'angle des sollicitations et de la durabilité

Deux types d'ouvrages composant l'installation d'entreposage peuvent être distingués sous l'angle des sollicitations phénoménologiques et de la durabilité :

- l'ouvrage qui contient les colis (hall d'entreposage, casemate, galerie ou fosse selon l'option technique) ;
- les bâtiments ou les ouvrages annexes.

Les ouvrages contenant les colis sont physiquement et phénoménologiquement au cœur de l'installation d'entreposage : (i) leur durabilité est nécessaire à la fonction même de l'entreposage, (ii) ils sont le siège potentiel de processus phénoménologiques importants dont dépend la durabilité des colis (dégagement de chaleur ou de gaz, rayonnement, corrosion…). (iii) en limitant ou empêchant les interactions externes, les dispositions de conception leur confèrent une évolution phénoménologique similaire à celle d'un système pseudo-fermé, ou du moins indépendante de celles des autres ouvrages de l'installation d'entreposage et non affectée par les sollicitations externes. (cf. Figure 8.2-1)

Les ouvrages annexes sont pour la plupart indépendants des ouvrages contenant les colis, soit parce que du point de vue de la ventilation ils sont en amont de ces ouvrages, soit parce que les dispositions de conception empêchent ou limitent fortement les interactions (cas du calorifuge de la dalle de la fosse d'entreposage de l'installation et de la ventilation naturelle, qui limitent le transfert de chaleur vers la dalle). Seuls les ouvrages annexes situés en aval aéraulique des ouvrages contenant les colis sont en interaction avec ces derniers par l'intermédiaire de l'air de ventilation. (cf. Figure 8.2-1).

[212] L'installation E-EV-SE est ainsi munie de filtres électrostatiques en entrée d'air (voir Chapitre 3).

Dans le détail, et toujours sous l'angle de la phénoménologie, on distingue pour tous les ouvrages :

- le gros œuvre, qui se décline en un ensemble de composants massifs, comme les murs externes et internes, les radiers, les voiles internes, les dalles ;
- les autres structures, qui se déclinent en un ensemble de composants comme les puits d'entreposage et les amortisseurs de chute dans la fosse d'entreposage des colis HA de E-EV-SE à La Hague.

En terme de matériaux, le gros œuvre renvoie préférentiellement à du béton armé tandis que les autres structures renvoient préférentiellement à des matériaux métalliques.

La Figure 8.2-2 schématise la conceptualisation matérielle d'une installation d'entreposage vue sous l'angle de la phénoménologie et de la durabilité.

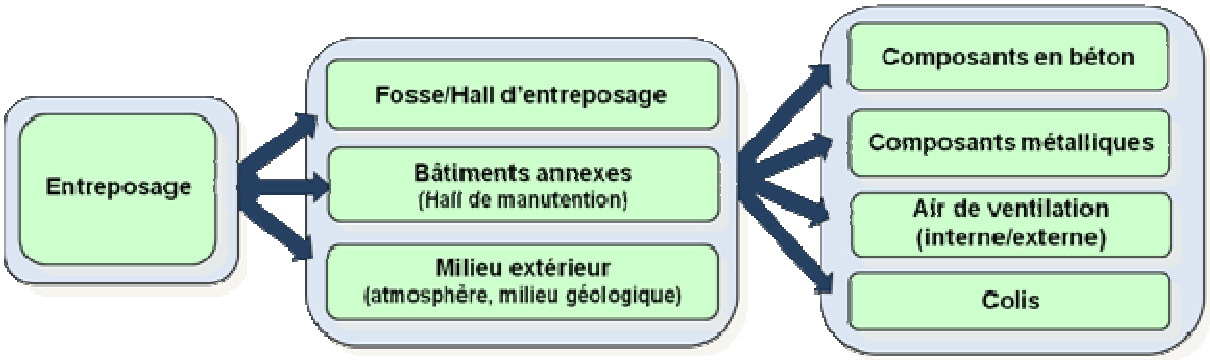


Figure 8.2-2 Conceptualisation matérielle d'une installation d'entreposage vue sous l'angle de la phénoménologie et de la durabilité

8.2.6 L'indépendance phénoménologique entre les entreposages HA et MAVL

Par leur éloignement physique et l'indépendance de leurs circuits de ventilation, les installations d'entreposage respectives des colis HA et MAVL sont en général phénoménologiquement indépendantes.

Certains déchets MAVL présentés au chapitre 2 sont néanmoins entreposés dans des installations pour déchets HA (familles F2-3-11, F2-4-05 et F2-4-14). Par ailleurs, des installations HA et MAVL peuvent être couplées, comme le bâtiment 136 du Centre de Dessel (Belgique) et le Habog (Pays-Bas) présentés au chapitre 3.

Dans ces cas particuliers, et d'une manière générale lorsque des colis de déchets de natures différentes sont entreposés à proximité les uns des autres, une attention particulière doit être portée aux interactions phénoménologiques. Par exemple, un éloignement suffisant doit être défini pour limiter l'exposition de déchets MAVL sensibles à la radiolyse ou à la température, au rayonnement gamma ou à la chaleur émis par d'autres types de déchets.

8.3 Les grands processus

Les phénomènes mis en jeu dans l'évolution phénoménologique de l'entreposage et de son environnement géologique sont multiples. Compte tenu de la chronologie, de l'enchaînement et du couplage des processus phénoménologiques, ce récit n'est pas linéaire. Il est découpé sur la base d'un chronogramme général d'évolution de l'entreposage par grands phénomènes classés non pas par ordre d'apparition, mais en fonction de leurs implications sur le déroulement des autres phénomènes. Il est ainsi possible de dégager un ensemble de grands processus qui serviront de guide pour l'analyse et la description de l'évolution phénoménologique qui suit.

La ventilation est l'élément majeur qui, en pilotant les conditions d'environnement internes (couple température – humidité relative), conditionne les grands processus hydrauliques/hydriques, chimiques, mécaniques et radiologiques qui affectent les composants.

Dans la suite, les grands phénomènes affectant l'évolution de l'entreposage seront traités successivement ainsi que leurs couplages.

8.3.1 Découplage phénoménologique entre l'environnement externe et l'environnement interne

Comme indiqué au § 8.2.4, les dispositions de conception retenues font que les sollicitations externes (principalement thermique et hydraulique/hydrique) ne sont pas (significativement) répercutées sur l'environnement interne de la majeure partie de l'entreposage. Tout se passe comme si celui-ci possédait une inertie vis à vis de l'extérieur. Cette inertie est liée pour une grande part au conditionnement de l'air de ventilation, mais aussi au gros œuvre dont les dimensions, par exemple les épaisseurs des murs en béton (cas des entreposages de surface) ou des revêtements/soutènements (cas des entreposages à faible profondeur), leurs caractéristiques physico-chimiques, par exemple les formulations de béton, ou les composants de revêtement, par exemple le bardage des murs externes, « tamponnent » les sollicitations externes : ainsi les sollicitations hydriques/hydrauliques et thermiques restent des phénomènes affectant la peau externe des murs en béton du gros œuvre. On peut donc considérer de manière indépendante l'évolution interne des composants de l'entreposage et leur évolution externe.

Seuls les ouvrages et les composants ventilés et situés en amont du dispositif de conditionnement de l'air de ventilation pour l'entreposage MAVL et les ouvrages d'entreposage des colis HA, peuvent voir en interne les sollicitations thermiques et hydriques cycliques de l'air atmosphérique (cycles chaud et froid et condensation/évaporation) qui peuvent avoir des conséquences mécaniques et chimiques (corrosion par exemple). Des dispositions de conception peuvent être prises pour minimiser les phénomènes cycliques, et par ailleurs, ces ouvrages et ces composants peuvent faire l'objet d'une surveillance et d'une maintenance.

Enfin, l'air de ventilation en sortie de l'installation constitue une sollicitation potentielle sur l'environnement externe (atmosphère) : rejet d'un air à température différente de celle de l'atmosphère et contenant des gaz (hydrogène et/ou gaz radioactifs). Toutefois, par conception, (i) on évite un bouclage aéraulique entre l'air sortant et l'air entrant, et (ii) la capacité de dilution de l'atmosphère limite le panache thermique et garantie une dilution des gaz rejetés.

Par conséquent, les processus décrits ci-dessous concernent majoritairement ce qui se passe à l'intérieur de l'entreposage.

8.3.2 Processus thermique et hydraulique

<u>Etat hygrométrique de l'air de ventilation et charge thermique</u>

Cas de l'entreposage MAVL

En entrée du système de ventilation, les caractéristiques thermiques et hygrométriques dépendent des cycles journaliers et saisonniers. En passant sur un dispositif de conditionnement éventuel, l'air est desséché et son humidité relative est réduite (de l'ordre de 50 %). Il passe ensuite dans les ouvrages contenant les colis primaires où il ventile les colis ; il y conserve son hygrométrie du fait des débits importants et de l'absence d'échange significatif d'eau et de chaleur avec les colis primaires et les ouvrages (convection forcée). La conception du circuit aéraulique et le caractère modulaire de l'entreposage garantissent d'une part ce comportement quel que soit le niveau de chargement en colis, et l'homogénéité de l'hygrométrie au sein des ouvrages contenant des colis.

En cas d'arrêt accidentel de la ventilation, qui peut par conception durer quelques jours, voire quelques semaines sans remettre en cause la pérennité des colis et des installations d'entreposage, il peut y avoir une modification de l'hygrométrie dans tout ou partie des ouvrages contenant les colis, dans un sens qui est fonction de la saison ; diminution de la température et de l'humidité relative en hiver et augmentation en été. Cela peut entraîner une condensation d'eau, généralisée ou localisée. On notera toutefois que, dans le cas des entreposages de colis MAVL faiblement exothermiques, une thermoconvection peut par conception suppléer la ventilation mécanique et permettre une évacuation significative de la chaleur émise (c'est le cas de l'installation ECC à La Hague). Dans tous les cas, la reprise de la ventilation conduit en quelques jours à un retour aux conditions en fonctionnement normal, notamment l'évacuation de la chaleur émise par les colis MAVL faiblement exothermiques.

L'air est ensuite rejeté dans l'atmosphère en tout ou partie, suivant son recyclage ou non à l'intérieur de l'installation.

Cas de l'entreposage HA

L'entreposage HA diffère d'autant plus de celui MAVL que la puissance thermique des colis HA est plus importante. Si les conditions thermiques ne sont pas ou peu influencées par l'ensemble des processus hydrauliques, chimiques ou mécaniques, qui affectent l'entreposage, elle est en revanche fortement dépendante des conditions de fonctionnement aéraulique de l'installation et des transferts thermiques convectifs qui s'y instaurent :

- relation directe entre ventilation et conditions thermiques dans le cas de la ventilation mécanique ;
- couplage entre ventilation et conditions thermiques dans le cas de la ventilation par thermoconvection : la ventilation contribue à dissiper l'essentiel de la puissance thermique dégagée par les colis ; la puissance thermique dégagée par les colis contribue à amorcer puis à entretenir la ventilation (voir l'encadré suivant).

Le chapitre 6 a montré l'intérêt du mode de refroidissement par ventilation naturelle qui se met en place par thermoconvection : action combinée de la conduction, de l'accumulation d'énergie et du mouvement de l'air spontanément mis en mouvement du fait des variations de masse volumique générées par les gradients thermiques locaux.

La mise en place progressive des colis de déchets HA déclenche une élévation de température progressive au sein des ouvrages contenant les colis, qui enclenche une thermoconvection de plus en plus importante. Cette thermoconvection évacue une partie des calories par la circulation d'air auto-entretenue tout au long de la phase thermique :

- Lors du chargement progressif de l'installation, la puissance thermique augmente dans l'ouvrage d'entreposage. Lorsque la charge thermique (i.e. le nombre de colis chargés) est suffisante pour que les forces de flottabilité compensent les pertes de charge, et sous des conditions extérieures favorables, le point de fonctionnement thermo-convectif est atteint et donne naissance à une circulation naturelle.
- Lors du déchargement progressif ou à pleine charge du fait de la diminution de la puissance thermique des colis par décroissance radioactive, la puissance thermique totale dans l'installation décroit, ainsi que la thermoconvection.

Les conditions climatiques extérieures (pression, température, vent…) entraînent une fluctuation de la thermoconvection. Le dimensionnement de l'installation doit garantir un niveau de fonctionnement thermo-convectif permanent.

La thermoconvection n'évacue pas la totalité des calories émises par les colis de déchets. Une partie est évacuée par rayonnement et conduction dans la structure d'entreposage. Dans le cas d'un entreposage type E-EV-SE, la température de l'air peut d'après les modélisations atteindre 240 °C à pleine charge dans les puits verticaux et 450 °C en cœur des colis HA (soit en deçà du seuil de transition vitreuse de la matrice verre), 340 °C en peau de conteneur, soit une différence de température maximum de l'ordre de 200 °C entre le cœur des colis et l'air.

La température au sein des colis est relativement homogène dans leur section transversale, du fait de la conductivité thermique significative du verre. La différence de température entre le haut et la base des piles de colis est de l'ordre de 120 °C. Latéralement, entre les piles de colis en entrée d'air et celles en sortie d'air, les différences de température sont de l'ordre de quelques dizaines de degrés Celsius. Par conséquent, au regard des niveaux de température atteints, l'air et les infrastructures de l'installation peuvent être considérés comme thermiquement relativement homogènes. Au niveau de la cheminée d'évacuation, l'air chaud évacue une partie de ses calories par échange avec l'air atmosphérique via la surface de la cheminée, de sorte que sa température en entrée dans l'atmosphère a diminué jusqu'à atteindre de l'ordre de 150 °C.

Les hautes températures atteintes entraînent *de facto* une diminution importante de l'humidité relative de l'air qui devient sec. En outre, le caractère relativement homogène des températures au sein de l'installation contribue à empêcher une condensation locale d'eau par effet de paroi froide. Bien que jamais observé, ce processus peut apparaitre transitoirement en début de chargement des colis lorsque les températures verticales et latérales sont significativement différentes, notamment en pied des piles de colis.

Les dispositions de conception, comme le calorifuge sur les parois latérales et en partie haute de l'installation, évite de charger thermiquement le gros œuvre. Les élévations de température restent limitées en peau des composants du gros œuvre et les températures maximales n'excèdent pas 70 °C, d'où des gradients thermiques de l'ordre de quelques degrés Celsius par mètre à quelques dizaines de degrés Celsius par mètre au maximum.

Etat hydrique (*i.e.* saturation en eau) des composants

L'humidité relative de l'air au sein de l'installation d'entreposage, faible, homogène et constante dans le temps, entraîne un état hydrique sec et homogène de l'ensemble des composants de l'installation. L'ensemble des composants en béton (gros œuvre, conteneur béton de colis MAVL, matrice de déchets MAVL…) sont fortement désaturés et ce de manière homogène ; il n'y a pas d'eau condensée en paroi des composants métalliques. Plus particulièrement pour les colis déchets MAVL, il n'y a pas de condensation d'eau au sein des colis CSD-C, ni de reprise d'eau par les colis d'enrobés bitumineux.

Production, relâchement et transfert de gaz

Ces processus concernent principalement l'entreposage MAVL. Dans les conditions sèches d'environnement interne, des gaz non radioactifs essentiellement de l'hydrogène sont produits par radiolyse des déchets MAVL ou des matrices de conditionnement organiques (par exemple les enrobés bitumineux). Cette production est en effet indépendante des conditions hydriques. L'eau sous forme liquide ou vapeur est présente en très faible quantité au sein des colis MAVL, et sa radiolyse est *de facto* très limitée. Par ailleurs la présence d'oxygène dans les colis MAVL rend impossible la production d'hydrogène par corrosion des composants métalliques.

L'hydrogène produit par les colis MAVL est relâché en continu et évacué par l'air de ventilation qui en fonctionnement normal, en assure la dilution à des niveaux de plusieurs ordres de grandeur en deçà du seuil ATEx : elle empêche son accumulation et sa ségrégation, qui pourraient être à l'origine de surconcentration localisée (*i.e.* concentration supérieure au seuil d'explosivité de 4 % en volume).

En cas d'arrêt de ventilation, l'hydrogène produit peut s'accumuler au sein de l'installation. Le temps disponible pour la rétablir sans risque d'atteindre des concentrations proches à moins d'un ordre de grandeur du seuil ATEx est établi en fonction de la production d'hydrogène, éventuellement de la capacité de dilution d'une ventilation naturelle de secours et du volume interne de l'entreposage. Pour certains entreposages celui-ci est suffisant pour qu'un relâchement de dix litres par fût et par an, n'aboutisse à une concentration seuil de 4 % qu'après quelques années.

Encadré 8.3-1 La ventilation naturelle

La circulation naturelle de l'air en circuit ouvert entre un milieu intérieur (installation d'entreposage) et un milieu extérieur s'instaure lorsque les pertes de charges du circuit de ventilation (rugosité, filtres, coudes, chicanes, changement de section…) sont compensées par le ou les termes moteurs des écoulements. Ces termes moteurs naturels peuvent avoir plusieurs origines :

- des gradients de pressions entre les ouvertures amont et aval du circuit de ventilation, liés à l'accélération du fluide qui le contourne (effet « courant d'air ») ;
- des forces de flottabilité engendrées par la production d'une phase gazeuse (vapeur issue d'un liquide volatil par exemple qui se disperse dans l'air) ou des variations locales de la densité de la phase continue liées à la puissance thermique produite : l'air chaud voit sa masse volumique diminuer ce qui induit un mouvement vertical ascendant ;
- un effet de cheminée : lorsqu'il s'échauffe, l'air tend à s'élever par diminution de sa densité. Ce tirage thermique induit une dépression susceptible d'aspirer l'air plus frais du milieu extérieur en partie basse (effet thermosiphon) (cf. Figure 8.3-1). Cette dépression est proportionnelle à la différence de hauteur entre l'entrée (air frais) et la sortie (air chaud) ainsi qu'à l'écart de température entre le milieu intérieur et le milieu extérieur.

Plus particulièrement, la circulation par thermoconvection naturelle s'établit lorsque qu'un fluide change de température et se déplace alors verticalement sous l'effet des forces d'Archimède. Le changement de température d'un fluide influe en effet sur sa masse volumique (et sa viscosité), qui se trouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant. Lorsque ce phénomène moteur des transferts de fluide est couplé avec l'effet de cheminée, une circulation naturelle en circuit ouvert s'instaure entre le milieu intérieur (chaud) et le milieu extérieur (généralement plus froid). Les conditions de fonctionnement d'un tel système de ventilation dépendent essentiellement :

- du circuit aéraulique, et des pertes de charges qui s'y produisent (section des conduits de ventilation, présence de murs/cloisons, rétrécissements, coudes, filtres…) et de la différence de hauteur entre l'entrée et la sortie du fluide ;
- de la source thermique ;
- des conditions d'environnement extérieures (température, vent). En effet, les conditions atmosphériques déterminent (condition nécessaire mais pas suffisante) l'amorçage ou le désamorçage du point de fonctionnement en thermosiphon :
  - ✓ si la température extérieure est plus grande que la température intérieure, la circulation naturelle entre l'extérieur et l'intérieur est neutralisée ;
  - ✓ si la température intérieure est plus grande que la température extérieure (condition nécessaire mais pas suffisante) une circulation naturelle peut s'établir lorsque les pertes de charges régulières (frottements du fluide sur les parois) et singulières (filtres, changement de section, obstacles…) sont compensées par les forces de flottabilité.

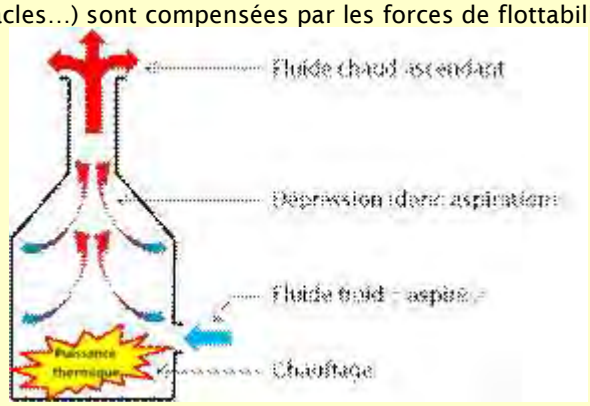


Figure 8.3-1 Principe de fonctionnement de la ventilation passive par circulation en thermoconvection naturelle (thermosiphon)

8.3.3 Processus chimiques

Les processus chimiques dans les colis de déchets HA et MAVL sont empêchés ou limités par l'état hydrique sec de l'entreposage, associé à la température.

Corrosion des composants métalliques

Les processus de corrosion susceptibles d'affecter les composants métalliques internes de l'entreposage (conteneur métalliques de déchets MAVL, déchets métalliques MAVL, conteneur primaire de déchets HA, infrastructures métalliques…) vont dépendre du maintien des conditions de corrosion atmosphérique sèche. Pour les armatures en acier des bétons ces conditions sont liées à leur état désaturé. qui empêche ou limite fortement la carbonatation atmosphérique. Dans les bétons secs, la corrosion des armatures peut rester très faible sur la durée séculaire de l'entreposage.

Carbonatation atmosphérique des composants en béton

L'état désaturé des composants de structure en béton concourt à limiter ou empêcher la carbonatation atmosphérique, à savoir la réaction du béton avec le dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'air de ventilation et les élévations de température ont peu d'influence sur le phénomène.

Les faces externes des composants de structure en béton soumises aux variations climatiques peuvent se trouver périodiquement à des degrés de saturation en eau permettant le développement de la carbonatation atmosphérique ; toutefois, les dispositions de conception peuvent en limiter l'extension. De manière générale, il est possible d'adopter des dispositions constructives pour que sur la durée séculaire d'exploitation, l'extension de la carbonatation atmosphérique n'excède pas l'échelle centimétrique, donc inférieure aux épaisseurs de protection des armatures.

Dégradation chimique des colis de déchet

La composition et la structure des colis (HA et MAVL) recouvrent une grande diversité de matériaux, donc de processus de dégradation chimique.

Néanmoins, comme déjà souligné ci-dessus, les conditions sèches de l'entreposage et l'état fortement désaturé des colis de déchets empêchent ou tout au moins limitent fortement les processus chimiques tels que la corrosion (conteneurs ou déchets métalliques) et la carbonatation atmosphérique des composants en béton des colis de déchets MAVL (conteneur et matrice de conditionnement).

Plus spécifiquement pour les déchets ou les matrices de déchets MAVL hydrophiles, comme les boues bitumées, il n'y a pas de reprise d'eau susceptible d'entrainer des processus chimiques, par exemple de dissolution.

8.3.3.1 Processus mécaniques

Structure générale de l'entreposage

Dans les conditions d'entreposage, les propriétés mécaniques des composants sont préservées sur l'échelle de temps séculaire de l'exploitation. Ces composants sont soumis principalement à leur poids propre (cas de l'entreposage de surface) ou au poids des terrains sus-jacents (cas de l'entreposage à faible profondeur), et pour certains comme les dalles au poids des colis de déchets entreposés. Le dimensionnement des structures doit tenir compte des sollicitations mécaniques, qui globalement sont faibles, de sorte que les contraintes et les déformations engendrées sont limitées et restent dans un domaine de comportement très éloigné de la rupture.

Composants de structures de l'entreposage HA

Les composants de structure de l'entreposage HA (chemise, amortisseurs de chute …) sont soumis à une forte élévation de température au fur et à mesure du chargement des colis. Il en résulte une dilation thermique. Toutefois, par conception (possibilité de déplacement libre), les contraintes thermomécaniques sont globalement faibles ou supprimées par des dispositifs ad hoc (soufflet de compensation thermique au niveau des puits métalliques par exemple).

Colis de déchets

Les colis de déchets HA

Comme pour les composants de structures, sous l'effet de l'élévation de température, les composants des colis de déchets HA (enveloppe métallique, matrice vitreuse et vide apical) se dilatent : (i) le vide apical permet d'encaisser les déformations de la matrice vitreuse, empêchant ou limitant toute fracturation nouvelle du verre et la mise en contrainte significative du conteneur en acier inoxydable par le verre qui se dilate, (iii) la pression du vide apical augmente mais reste inférieure à 2 bars, donc sans constituer une contrainte interne forte sur le verre et le conteneur.

Les colis sont donc soumis principalement à leur poids propre ou au poids des colis HA sus-jacents lorsqu'ils sont empilés dans les puits d'entreposage.

Sur la durée séculaire d'exploitation, les processus chimiques de corrosion sont limités, de sorte qu'ils n'influencent pas l'évolution mécanique. Le fluage en température des composants métalliques entraîne des déformations limitées qui ne remettent pas en cause leur durabilité.

Au fur et à mesure du déchargement des colis, la décroissance de température entraîne progressivement le phénomène inverse de contractance et une diminution des quelques contraintes thermomécaniques générées lors du chargement des colis.

Les colis de déchets MAVL

Comme pour les composants de structures, l'état sec supprime ou limite fortement les évolutions chimiques et permet de maintenir les propriétés mécaniques sur la durée séculaire de l'exploitation. Les colis sont soumis à leur poids propres ou aux poids éventuel des colis sus-jacents. Les contraintes et les déformations générées sont faibles

Plus particulièrement pour les colis d'enrobés bitumineux, on notera que la production d'hydrogène par radiolyse conduit à un gonflement du bitume qui est normalement absorbé par le vide apical laissé dans les colis primaires.

8.3.4 Processus radiologiques

8.3.4.1 Entreposage HA

Les irradiations internes α et β/γ n'entraînent pas sur la durée de l'entreposage d'altération de la structure du verre (séparation de phase, dévitrification, microfissuration, changement de composition, formation de bulles d'oxygène…). Les volumes d'hélium 4 produits dans un colis de verre R7 et T7 (colis type C1) par les particules α sont d'environ 11 litres à 100 ans. Elles migrent dans la structure vitreuse et les pressions internes ne provoquent pas de microfissuration.

On notera que du fait de la faible teneur des colis HA en matières fissiles (plutonium 239 et curium 244), le système ne peut pas atteindre le seuil de criticité.

Le rayonnement β/γ externe n'a pas d'effet sur les structures métalliques ainsi que sur l'air de ventilation, du fait notamment de son état sec.

8.3.4.2 Entreposage MAVL

Les rayonnements n'ont pas d'effet ni sur les déchets et les conteneurs métalliques, ni sur les composants de structure en béton et l'air de ventilation, notamment du fait de leurs états secs. En revanche, ils affectent les déchets contenant des composés organiques, en particulier la matrice bitume, et les composés organiques des colis de déchets technologiques (PVC, polyuréthane, cellulose…).

En peau des colis de boues bitumées, la combinaison de l'oxydation (air de ventilation) et de la radiolyse (radio-oxydation) sous l'effet de l'irradiation issue des sels radioactifs enrobés, entraîne la formation de CO, de CO_2 et d'espèces organiques oxygénées ainsi que l'augmentation de la viscosité du bitume. Sur une durée séculaire, l'oxygène ne diffuse à l'intérieur du bitume que sur une distance d'ordre centimétrique. La radio-oxydation du bitume affecte donc une épaisseur limitée des colis et reste un phénomène de peau.

La partie interne de la matrice est soumis à des processus de radiolyse en conditions insaturées et sans oxygène. Cela entraîne principalement la production d'hydrogène par radiolyse de la matrice bitume. D'autres gaz, tels que CH_4, C_2H_6 ou C_2H_2, sont également produits, mais en petite quantité.

L'hydrogène produit est évacué, dans un premier temps, par diffusion. Dans un second temps, lorsque les teneurs en hydrogène dépassent le seuil de solubilité, il se forme des bulles de gaz qui migrent hors de l'enrobé. Les sels ne participent pas aux processus de radiolyse, excepté les sels de cobalt utilisés pour les boues bitumées qui consomment une partie de l'hydrogène produit sur une échelle de temps de plusieurs dizaines d'années ; pour ces colis types, le gonflement dû à la production d'hydrogène ne s'amorce qu'après épuisement des sels de cobalt.

La radiolyse des déchets technologiques plastiques conduit à la formation de gaz comme H_2, CO_2, CH_4 et HCl. Tous ces gaz sont évacués par la ventilation.

8.3.5 Relâchement et transfert de radionucléides en solution et gazeux

En conditions normales de fonctionnement, la très faible évolution chimique des colis (HA et MAVL) et l'état d'environnement sec dans l'entreposage conduisent à l'absence de relâchement de radionucléides en solution pendant la durée séculaire d'exploitation.

Concernant les radionucléides gazeux, l'intégrité physique des colis HA fait qu'il n'y a pas de relâchement pendant la période d'exploitation séculaire. En revanche, comme déjà indiqué au § 8.3.2, certains colis MAVL, tels que les CSD-C (avec leur pastille de respiration) sont susceptibles de relâcher des gaz radioactifs (Tableau 8.3-1).

Tableau 8.3-1 Exemple d'inventaire en radionucléides potentiellement gazeux de colis MAVL : cas du CSD-C

Concentration (mol/colis)	B5.2.1
^{3}H	$1,4\times10^{-2}$
^{14}C	$3,4\times10^{-4}$
^{36}Cl	$7,3\times10^{-7}$
^{85}K	$6,7\times10^{-4}$
^{129}I	$5,3\times10^{-6}$

8.4 Principaux éléments déterminant l'évolution phénoménologique des entreposages

Un entreposage est un ouvrage de génie civil en béton associé à des structures métalliques, situé dans un environnement atmosphérique (climatique) et un environnement géologique. Il est potentiellement soumis à des sollicitations de différentes natures : externes (issues des environnements atmosphériques et sol) et internes (issues des colis et de l'air de ventilation).

La durabilité de l'installation d'entreposage et l'intégrité des colis sur une échelle de temps séculaire reposent *in fine* sur des processus couplés mécaniques et chimiques, qui dépendent pour une grande part de l'état hydrique et hydraulique, et de la température. L'adoption de dispositions de conception *ad hoc* déjà pratiquées pour les installations existantes ou dans les ouvrages de génie civil peut favoriser la durabilité de l'installation. Elles doivent placer l'installation dans des conditions d'environnement internes et externes qui limitent ou empêchent les processus majeurs de la dégradation des composants de l'entreposage que sont la corrosion des métaux et la carbonatation atmosphérique (et dans une moindre mesure sous eau) des bétons.

Le conditionnement de l'air de ventilation, de manière active pour l'entreposage MAVL ou passive pour l'entreposage HA, constitue la disposition de conception la plus importante : en imposant des conditions d'environnement internes sèches et les plus constantes possibles. Ceci permet de garantir la durabilité mécanique de l'installation et l'intégrité physico-chimique des colis de déchets. Cette disposition peut être confortée par le choix de bétons de haute performance et de matériaux métalliques passivables, comme les aciers inoxydables.

Les conditions physico-chimiques de l'entreposage MAVL peuvent être comparées à celles des alvéoles de stockage MAVL ventilés pendant la période d'exploitation du stockage. En revanche, celles de l'entreposage HA s'écartent de celles des alvéoles correspondantes du stockage : en entreposage ce sont la densification des colis et corrélativement les hautes températures atteintes qui génèrent les meilleures conditions de la durabilité des colis, là encore au travers d'un environnement. A cela, il convient d'ajouter les dispositions de conception visant à ne pas charger thermiquement les ouvrages de génie civil de l'entreposage HA.

L'organisation temporelle des grands processus est illustrée sur la Figure 8.4-1 (page 314).

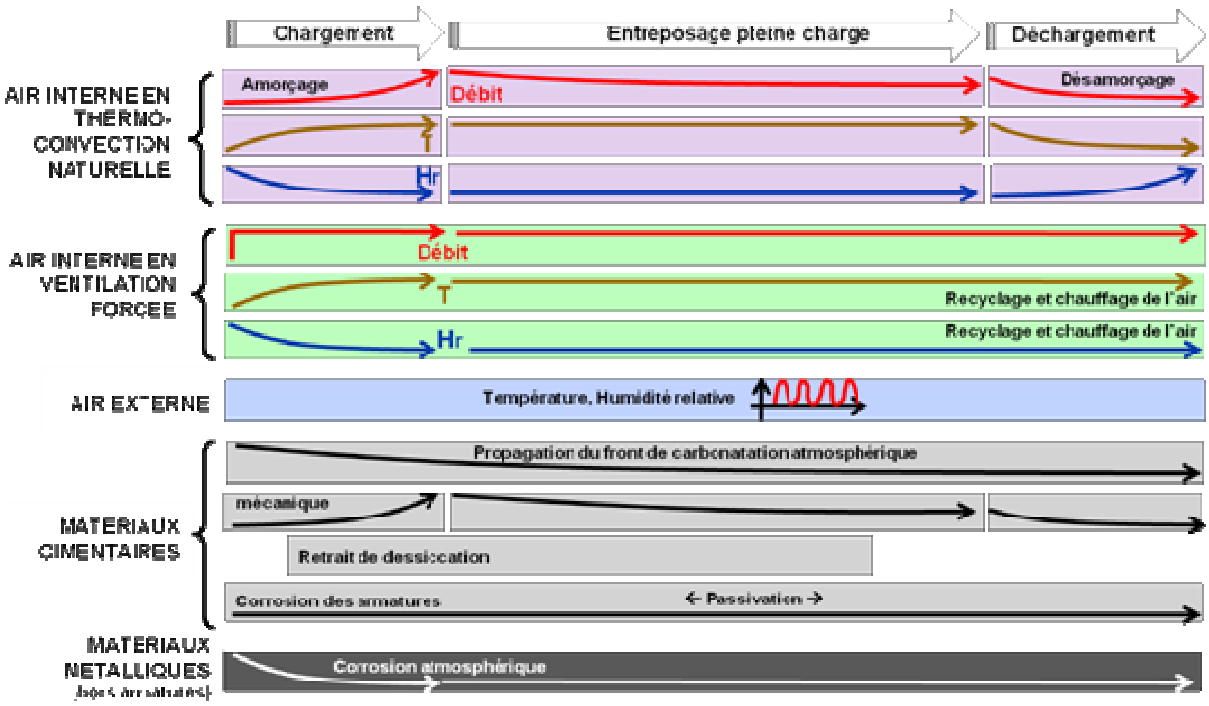


Figure 8.4-1 *Chronogramme des processus phénoménologiques qui affectent les composants d'une installation d'entreposage (implantée en surface)*

9

Application des recherches à l'extension de l'entreposage des déchets HA vitrifiés sur le site de la Hague

9.1 Les structures en béton armé 317

9.2 La thermo-aéraulique et les circuits de ventilation 318

9.3 L'amélioration de la surveillance et du monitoring 319

Areva NC a décidé en 2006 d'engager l'étude de la première extension de l'entreposage des déchets vitrifiés E-EV-SE à La Hague (voir le chapitre 3).

L'un des objectifs visés par Areva NC était de prolonger la durée prévisionnelle d'exploitation par rapport aux installations déjà construites : passage de 50 à 75 ans, exploration des possibilités de porter cette durée à 100 ans, sachant qu'en application des normes européennes de conception, de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil (Eurocodes), cela peut se traduire par des modifications significatives de la conception.

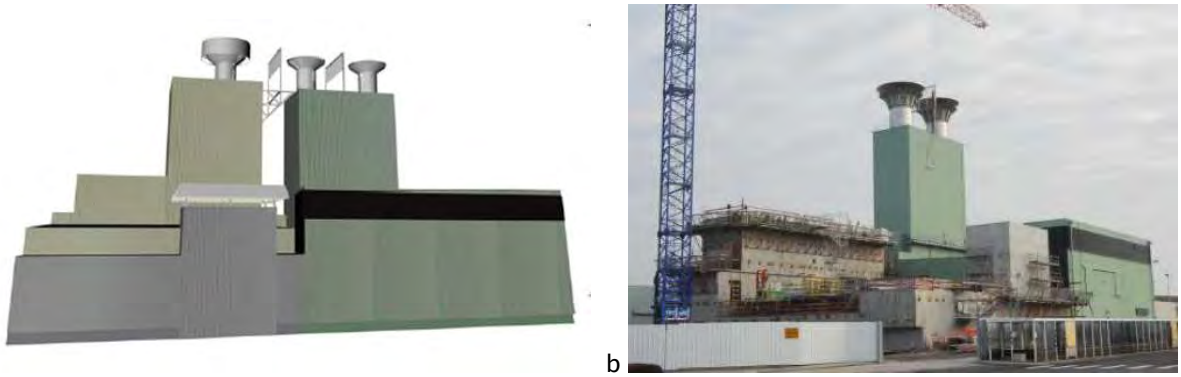
Conformément au cadre fixé par la loi du 28 juin 2006, Areva NC et l'Andra ont créé en 2007 un groupe de travail chargé de proposer des axes d'innovation sur le projet d'extension de E-EV-SE. Areva Ingénierie (SGN) a été associée au groupe de travail en tant que maître d'œuvre du projet.

L'objectif poursuivi était double : (i) accroître la durabilité et la robustesse de la future installation, (ii) tirer un retour d'expérience pour la conception de la future génération d'entrepôts.

Les axes de travail ont été identifiés à partir du diagnostic qu'Areva et le CEA avaient réalisé dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 sur l'aptitude à la longue durée des entrepôts industriels existants, en particulier E-EV-SE et ECC (voir le chapitre 3). Ils ont été organisés autour de trois thématiques : les structures en béton armé (section 9.1), la thermo aéraulique et la tenue des circuits de ventilation (section 9.2), la surveillance et le monitoring (section 9.3).

Areva NC, maître d'ouvrage et futur exploitant, a intégré au cahier des charges de l'extension de E-EV-SE un ensemble de dispositions issues des recommandations du groupe de travail, après en avoir analysé l'impact sur le projet industriel.

La figure suivante montre le principe d'implantation de l'extension par rapport à l'installation existante de E-EV-SE ainsi qu'une vue du chantier en début d'année 2012.



a b

La construction de l'extension de l'entreposage E-EV-SE des colis standards de déchets vitrifiés à La Hague (source Areva)

a – Schéma général d'implantation (à gauche, le projet d'extension)
b – vue du chantier

9.1 Les structures en béton armé

9.1.1 Le comportement phénoménologique du génie civil

Le vieillissement des structures en béton armé est lié à la pénétration dans le matériau du gaz carbonique de l'air qui entraîne une dépassivation des armatures en acier et leur corrosion. La venue au contact des bétons d'ions agressifs comme les ions chlorure présents dans les embruns apportés par l'atmosphère littorale est susceptible d'accélérer cette corrosion (voir le chapitre 8).

Des phénomènes endogènes entre les granulats et la matrice cimentaire comme les alcali-réactions ou les réactions sulfatiques peuvent également entraîner une dégradation des bétons. Il est possible de les éviter par un choix approprié des granulats et du ciment.

La pénétration du gaz carbonique dans le béton dépend de sa porosité initiale et du développement de la microfissuration qui apparaît lors de la prise puis après durcissement, sous l'effet des contraintes thermomécaniques.

Les zones extérieures sont protégées de l'environnement : en partie haute, le parement extérieur des fosses est revêtu d'un bardage métallique avec isolant thermique, dont la durabilité est assurée par des opérations de maintenance, qui protège le béton de l'air, de l'eau et des embruns salins ; en sous-sol, le béton est protégé par un cuvelage et un drainage des eaux souterraines.

Le débit de dose dans les fosses d'entreposage de E-EV-SE, après remplissage par les colis CSD-V, est de 10^2 Gy.h^{-1}. Les études sur la tenue à l'irradiation des bétons armés menées par le CEA ont montré que les endommagements radio-induits sont faibles tant que la dose cumulée reçue reste inférieure à 10^{11} Gy. Cette limite est mille fois supérieure à la dose reçue dans le cas de E-EV-SE au bout de cent années d'exploitation.

9.1.2 Les spécifications des bétons : formulation et choix des armatures.

Le groupe de travail Andra-Areva a recommandé d'optimiser la formulation des bétons de structure de l'extension de E-EV-SE en vue d'améliorer leur durabilité.

Au final un ciment de la classe CEM V (dont font partie les ciments à base de laitier de hauts fourneaux et de cendres volantes) a été privilégié pour les avantages suivants :

- une chaleur spécifique d'hydratation plus faible qui limite et ralentit la montée en température lors de la prise, ce qui réduit la microfissuration dans les parties où le béton est mis en œuvre en grande masse ;
- une meilleure résistance à l'alcali-réaction avec les granulats ;
- une conductivité aux gaz et aux liquides plus basse car les pores ont un diamètre plus petit (à dosages en eau et en ciment équivalents). En conséquence la pénétration du gaz carbonique et des espèces agressives est plus lente.

Bien que considérés plus résistants à la carbonatation que ceux de la classe CEM V, les ciments de la classe CEM I (Portland artificiel avec au moins 95 pourcents de clinker Portland) sont apparus globalement moins favorables au regard des points précédents.

Un dosage en ciment élevé de 330 kg.m^3 et un rapport eau/ciment inférieur à 0,55 permettent d'obtenir :

- une résistance mécanique élevée,
- une porosité réduite qui entraîne des coefficients de diffusion aux gaz et aux liquides inférieurs.

L'acier non allié a été préféré à l'acier inoxydable pour la fabrication des armatures pour sa meilleure adhérence avec le béton. En outre il est plus simple à mettre en œuvre et présente un mode de corrosion plus réparti ; l'acier inoxydable présente en effet un risque de corrosion localisée au droit des chocs et des zones fortement déformées à la fabrication.

9.1.3 Les dispositions constructives

Pour protéger les armatures de la corrosion, l'enrobage minimum par le béton a été porté à 5,5 centimètres au lieu des 4 centimètres préconisés par les Eurocodes.

Compte tenu des grandes épaisseurs des voiles, et de façon à limiter les élévations de températures dues à l'hydratation du ciment, le banchage est effectué par plots alternés ce qui permet de limiter le risque de fissuration au droit des joints de reprise.

Pour surveiller le développement éventuel d'une microfissuration, des thermocouples associés à des capteurs de déformation à cordes vibrantes sont placés dans la structure en béton armé au droit des parties les plus sollicitées au plan thermomécanique (voir la section 9.3).

Une isolation thermique améliorée constituée de caissons remplis de laine de verre isole les voiles en béton armé des sources de chaleur créées par l'empilement des colis de déchets.

9.2 La thermo-aéraulique et les circuits de ventilation

9.2.1 Le comportement phénoménologique des structures métalliques

Dans E-EV-SE l'air de refroidissement pénètre dans la double enveloppe des puits d'entreposage au niveau du plénum inférieur où se trouvent également les soufflets compensateurs de la dilatation thermique des puits (voir le chapitre 3). Les soufflets sont des pièces en acier inoxydable qui, lors du formage, subissent des déformations importantes susceptibles de diminuer leur résistance à la corrosion.

Au niveau où sont placés les soufflets, l'air n'a pas encore subi de réchauffement significatif, en particulier au début du chargement de l'entreposage, lorsque la charge thermique des colis est encore réduite. Les simulations thermiques montrent qu'il existe alors un risque de condensation. Une condensation peut conduire à une dégradation des aciers inoxydables si des chlorures se déposent. Ceux-ci ont en effet un caractère hygroscopique qui facilite la captation de l'humidité ambiante. Dans ces conditions une corrosion localisée des aciers inoxydables austénitiques, par piqûration, peut en théorie se produire.

Il est cependant à noter qu'aucune condensation ni empoussièrement par les embruns ni corrosion des soufflets de dilatation n'ont été observés dans E-EV-SE lors d'inspections du plénum inférieur par caméra.

9.2.2 Le choix des aciers inoxydables

Le choix des nuances d'acier inoxydable retenues pour E-EV-SE a été reconduit après avoir examiné l'utilisation d'alliages plus nobles qui présentent une meilleure résistance à la piqûration en milieu chloruré (Hastelloy®[213] C22, C276, etc.) ainsi que les matériaux composites. D'un coût plus élevé que les aciers inoxydables, l'Hastelloy est plus difficile à mettre en œuvre. Quant aux matériaux composites, ils présentent une mauvaise tenue à la radiolyse.

[213] L'Hastelloy (marque déposée de Haynes International, Inc) est un superalliage contenant principalement du nickel, ainsi que du chrome, du magnésium, du fer et du titane.

9.2.3 Les dispositions constructives

Les soufflets de dilatation de l'extension de E-EV-SE sont fabriqués en utilisant des technologies alternatives de formage qui permettent de réduire la longueur des cordons de soudure et corolairement les zones thermiquement affectées, plus sensibles à la corrosion.

Les soufflets sont placés en partie haute des puits d'entreposage et non plus en partie basse. En partie haute, l'air de ventilation est plus chaud ; par conséquent le risque de condensation y est absent. Les puits reposent sur le radier des fosses et ne sont plus suspendus à la dalle de couverture en béton armé qui assure la radioprotection.

Des ouïes d'entrée d'air sans filtre, analogues à celles mises en place sur ECC, remplacent les auvents avec registres et filtres à poussières utilisés sur E-EV-SE. Le retour d'expérience[214] a montré la meilleure robustesse de ces systèmes en particulier en cas de givre et de neige.

Des échantillons d'acier inoxydable récupérables seront placés dans une fosse d'entreposage à proximité de l'entrée d'air atmosphérique et dans l'ambiance la plus irradiante pour surveiller le vieillissement des pièces métalliques (voir la section 9.3).

9.3 L'amélioration de la surveillance et du monitoring

9.3.1 La température

Des capteurs de température sont placés dans la structure en béton armé, au niveau du radier de fondation et à différentes hauteurs dans les voiles, ainsi que dans les puits soumis aux contraintes thermo-hydriques extrêmes en fonctionnement normal.

9.3.2 La déformation de la structure en béton armé

Dans E-EV-SE les bétons les plus sollicités en compression sont ceux placés dans les zones intérieures au contact de la ventilation et soumises à des chargements thermiques.

Par ailleurs des sollicitations en traction susceptibles de provoquer de la microfissuration résultent du bridage des différents éléments de structure entre eux (structure hyperstatique) : ces sollicitations se développent sur les parements externes des fosses d'entreposage.

Des calculs menés par le CEA avant 2005 dans le cadre de ses recherches sur l'entreposage de longue durée ont simulé les champs de contraintes – déformations dans la structure hyperstatique d'un entreposage de colis de déchets HA. Ces calculs dont un exemple est donné sur la Figure 9.3-1, montrent la prédominance du chargement thermique sur le chargement mécanique, au demeurant modeste, qui est induit par le poids propre des structures et des colis. Ces calculs ne prennent toutefois pas en compte les effets du retrait de dessiccation du béton et les cycles thermiques saisonniers ou journaliers.

Des mesures de déformation ont été préconisées par le groupe de travail Andra-Areva, particulièrement dans les zones susceptibles de se fissurer et d'être exposées au risque de carbonatation ; il s'agit notamment des zones en tension sous l'effet de la dilatation thermique. Les capteurs de déformation doivent être associés à des capteurs de température.

Des extensomètres à corde vibrante ont été choisis (Figure 9.3-2). Leur capteur de température permet de corriger les mesures de déformation des dérives thermiques.

Les premiers extensomètres à corde vibrante ont été placés en 1932 dans le barrage hydro-électrique de La Bromme, en France. Sur les 17 capteurs placés à l'époque, 11 fonctionnent encore, 76 ans après leur mise en service. Ces capteurs ont été utilisés dans de nombreuses centrales nucléaires.

[214] L'entreposage des colis de déchets vitrifiés japonais situé à Rokkasho-Mura ne comporte pas de filtre en entrée du circuit de ventilation.

L'Andra a également une expérience des extensomètres à corde vibrante dans les ouvrages de stockage du CSA et dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. 200 capteurs environ y ont été installés. Un taux de 98 % de bon fonctionnement a été observé.

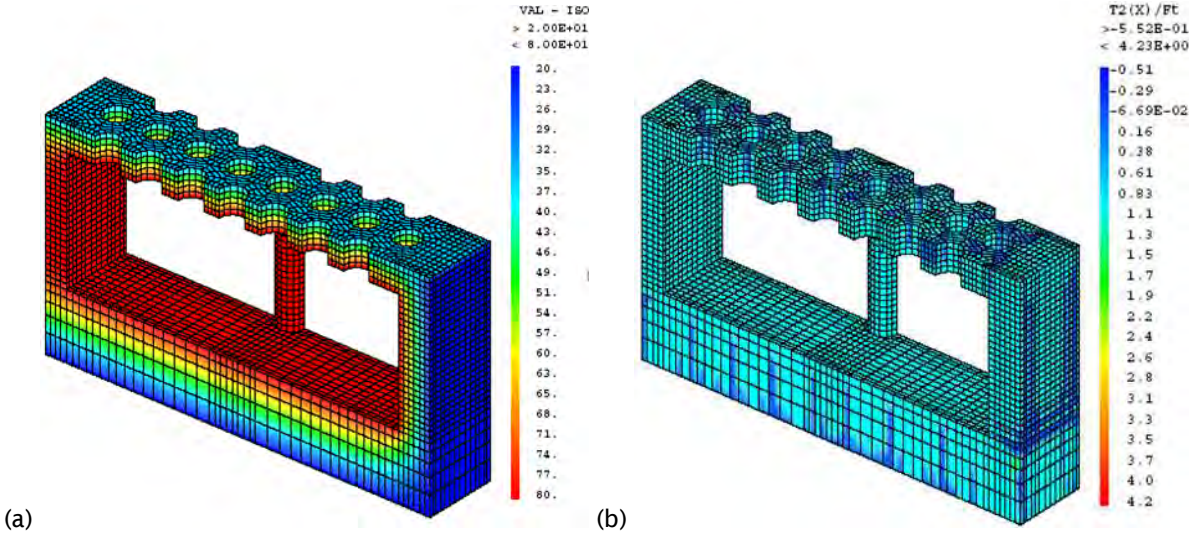


Figure 9.3-1 *Comportement sous les sollicitations thermomécaniques d'un alvéole d'entreposage de grande longueur de colis de déchets HA fortement exothermiques (source CEA)*

(a) Champ de température
(b) Zones de microfissuration potentielle induite

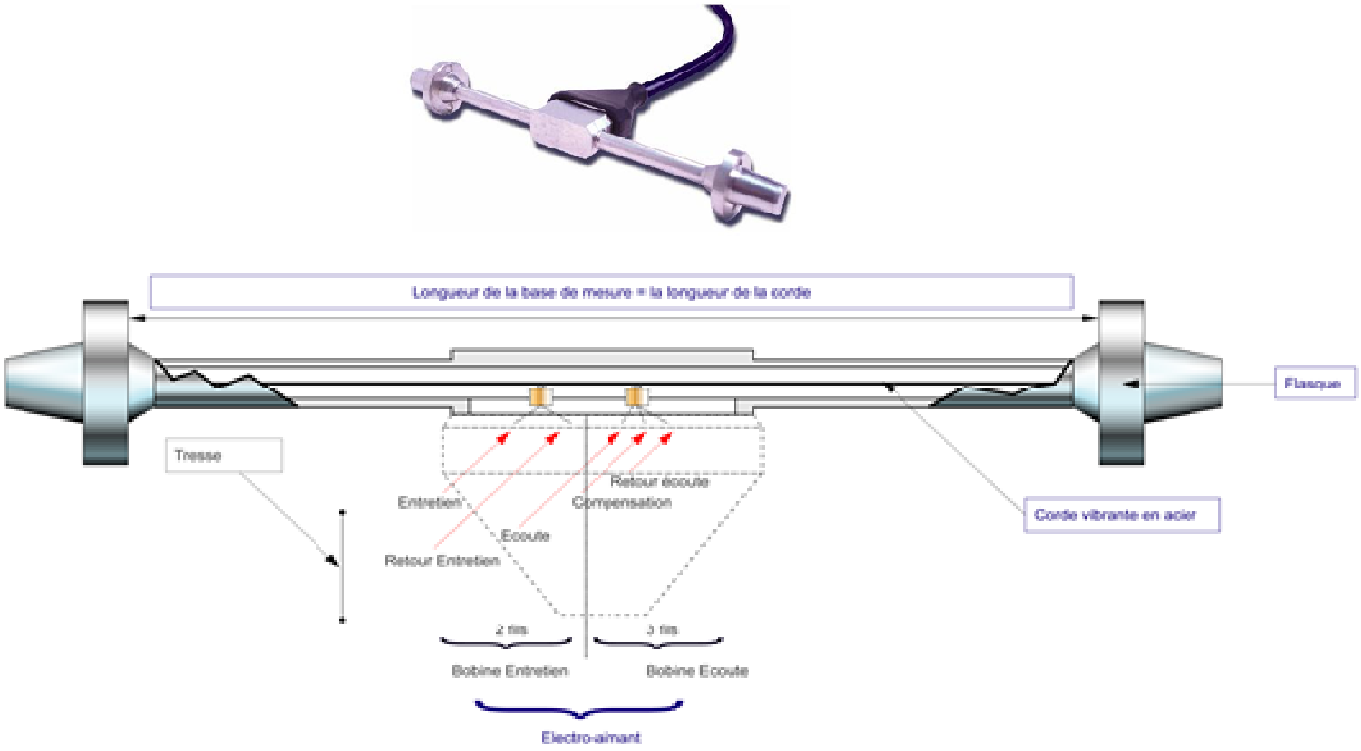


Figure 9.3-2 *Capteur de déformation à corde vibrante*

Les extensomètres à corde vibrante permettent des mesures de la déformation avec une résolution de l'ordre de 0,3 µm.m^{-1} via un système automatique d'acquisition qui intègre la commande des électroaimants d'excitation de la corde vibrante. Ces capteurs peuvent également mesurer le retrait du béton et détecter les phénomènes de microfissuration qui se développent localement

Ces capteurs sont fabriqués pour fonctionner jusqu'à 115 °C. Ils sont durcis pour pouvoir fonctionner en ambiance irradiante.

9.3.3 Le vieillissement des matériaux

Dans l'extension de E-EV-SE, un puits situé dans une fosse à proximité de l'entrée d'air de ventilation a été réservé pour y placer un porte-échantillons. Celui-ci sera retiré à intervalle de temps régulier pour observation et analyse en laboratoire du vieillissement des échantillons de matériaux.

Ce porte-échantillons est manutentionné par le système de manutention des colis de déchets vitrifiés. Avant leur expédition vers le laboratoire d'analyse, les échantillons témoins feront l'objet d'un contrôle d'absence de contamination, dans la cellule de contrôle des CSD-V.

Le puits d'observation ne comporte que l'enveloppe externe qui canalise l'air de ventilation. De cette façon les échantillons seront directement soumis à l'air atmosphérique avec la température la moins élevée et le degré d'hygrométrie le plus élevé, tout en étant exposés à l'irradiation induite par l'ensemble des colis entreposés.

La Figure 9.3-3 présente le puits dédié à l'observation, comprenant un amortisseur de chute et le porte-échantillons dans lequel seront placés des éprouvettes d'acier inoxydable des puits d'entreposage, d'acier au carbone des armatures, de béton, etc. ainsi que des maquettes de certains composants : joint de dilatation, amortisseur de chute, etc. Des capteurs pourront également y être placés pour suivre en continu la température, l'humidité relative, le débit de dose ou pour tester leur capacité à résister à une forte irradiation.

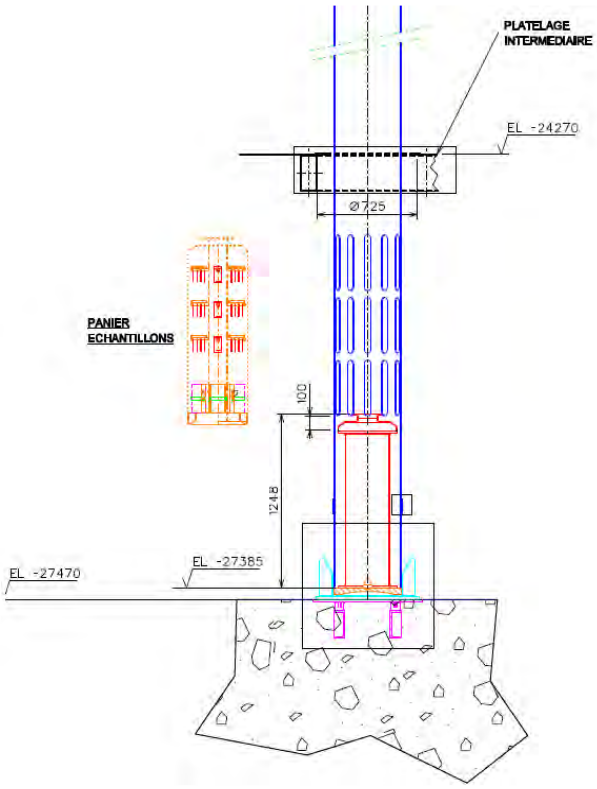


Figure 9.3-3 Coupe du puits d'observation de l'extension de E-EV-SE (source Areva)

10

Conclusions, perspectives

10.1 Besoins futurs en entreposage 324
10.2 Rappel des principaux résultats des études et recherches 326
10.3 Perspectives 327

10.1 Besoins futurs en entreposage

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

Dans la directive 2011/70/EURATOM du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, le Conseil de l'Union européenne considère que *« les déchets radioactifs doivent être confinés et isolés durablement des êtres humains et de la biosphère. Du fait de leur nature spécifique, à savoir de leur teneur en radionucléides, il est impératif de prendre des dispositions afin de protéger l'environnement et la santé humaine contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, y compris de mettre en place un stockage dans des installations appropriées qui serviront d'emplacement final. L'entreposage de déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire qui ne saurait constituer une alternative au stockage.* »

La loi du 28 juin 2006 a retenu dans son article 2 que *« la recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures. »* Elle programme la création du stockage en formation géologique profonde pour une mise en exploitation en 2025 sous réserve d'étapes préalables de débat public et d'autorisation. La réversibilité du stockage pourra préserver les mêmes libertés de choix qu'une poursuite de la gestion en entreposage, mais ajoutera la possibilité de fermer le stockage pour ne plus transmettre la charge de la gestion des déchets aux générations suivantes.

La perspective de création du stockage ne supprime pas le besoin d'entreposage. Après avoir été le moyen d'attendre la disponibilité du stockage, l'entreposage deviendra un outil de gestion complémentaire au stockage.

Les études et recherches menées depuis 2006 se sont inscrites dans cette complémentarité.

Une approche globale des scénarios de gestion industrielle des déchets associant l'entreposage et le stockage a été proposée en 2009. Elle a montré qu'il est possible d'optimiser le système industriel constitué de l'entreposage et du stockage, ainsi que des moyens de transport entre les sites, en utilisant au mieux les capacités d'entreposage existantes ou en projet. Les flux de colis mis en stockage pourront croître progressivement pendant une première période après la mise en service de Cigéo prévue en 2025. Cela ouvre la possibilité d'une montée en puissance graduelle, associée à la mise en place d'alvéoles témoins et à une revue qui permettrait de dresser un premier bilan au bout de quelques années d'exploitation de Cigéo. Il est ensuite possible de stabiliser dans le temps le niveau d'activité industrielle de Cigéo. L'exercice a aussi montré l'intérêt d'une mise en stockage par campagnes de différentes familles de colis, au regard des conditions d'exploitation et du nombre d'alvéoles à mettre à disposition dans chaque période, notamment pour la première tranche de Cigéo.

Un paramètre notable des scénarios de gestion industrielle est le choix d'une mise en conteneur de stockage sur le site de conditionnement ou sur le site de stockage. Cette question se pose en particulier pour la reprise des colis et déchets anciens du site de Marcoule.

Dans la continuité du premier exercice présenté en 2009, l'étape suivante a consisté en l'élaboration du programme industriel de gestion des déchets (PIGD), donnée d'entrée de l'étude d'esquisse du projet Cigéo. Le recensement des besoins en entreposage présenté en 2009 a été mis à jour en 2012 sur cette nouvelle base.

Le travail d'optimisation du système global entreposage-transport-stockage demande à être poursuivi de manière concertée entre les acteurs. Il conduira notamment à une mise à jour du PIGD en 2013. La qualité de l'optimisation sera d'autant meilleure que le travail comportera une analyse d'ensemble des différents maillons de la chaîne de gestion des déchets et une pondération des indicateurs aussi partagée que possible.

En 2009, l'Andra a montré l'intérêt d'un prolongement de l'entreposage des déchets HA fortement exothermiques au-delà de la durée minimale de décroissance thermique de 60 ou 70 ans, et en a évalué les conséquences sur l'entreposage. Le PIGD a ainsi retenu une durée de 85 ans.

En complément aux entrepôts existants, les créations et extensions d'installations en construction ou en projet par Areva, le CEA et EDF d'ici 2025 permettront de répondre, en termes de capacités et de durées, aux besoins à venir.

Pour les déchets MAVL, la création à court terme de l'installation DIADEM à Marcoule répondra à un besoin total estimé à 400 m^3 environ. De même l'installation ICEDA sur le site de Bugey permettra au final d'accueillir les 3 800 m^3.de colis de déchets activés MAVL provenant des réacteurs d'EDF. A ces besoins s'ajoute à l'horizon 2017 la nécessité de disposer de nouvelles capacités d'entreposage pour les colis d'enrobés bitumineux et de déchets anciens repris et conditionnés à Marcoule (extension de l'EIP et/ou création de l'IAE) : le besoin correspondant peut être estimé aujourd'hui de l'ordre de 6 000 à 7 000 m^3 (volume de colis primaires, hors colis d'enrobés bitumineux rattachés à la catégorie FAVL).

Dans les années 2020-2025, l'extension de CEDRA à Cadarache apportera une capacité supplémentaire de 5 200 m^3 environ. A La Hague, l'entreposage ECC de colis CSD-C devra être étendu. Si la capacité de cette extension n'est pas définie à ce jour, on peut estimer les besoins à 3 000 colis au moins à l'échéance 2030 et de l'ordre de 10 000 colis à l'échéance 2050, sur la base du PIGD.

Pour les déchets HA, l'extension de l'entreposage des verres à La Hague, en cours de construction (E-EV-LH) apportera une capacité supplémentaire de 1 516 m^3. Au-delà, Areva envisage à l'heure actuelle la mise en service de deux capacités d'entreposage de l'ordre de 8 400 places (soit 1 470 m^3), l'une en 2022 et l'autre en 2032.

Sur le site de Cigéo, comme pour toute installation industrielle, des capacités tampons seront nécessaires dans les installations de surface afin de découpler les flux d'arrivée de colis d'une part, de transfert vers l'installation souterraine d'autre part. Il s'agit de capacités limitées. Si l'étude prospective[215] de capacités d'entreposage plus importantes avait été proposée en 2009, cette option n'a plus été considérée ensuite après les échanges qui se sont tenus avec les parties prenantes du projet Cigéo (voir le chapitre 1). Les études et recherches sur l'entreposage menées dans le cadre de la loi du 28 juin 2006 sont ainsi orientées vers des installations futures qui seront implantées sur des sites d'Areva, du CEA et d'EDF.

La réversibilité du stockage pose la question de capacités d'entreposage qui accueilleraient, le cas échéant, des colis de déchets retirés du stockage. D'une manière générale, la construction des nouvelles installations qui seraient nécessaires dans une telle situation serait effectuée avant de procéder à la récupération des colis, particulièrement dans le cas d'un grand nombre de colis retirés.

[215] Pour les déchets HA, cette option renvoyait à une décision à l'horizon 2030.

10.2 Rappel des principaux résultats des études et recherches

L'Andra a proposé en 2007 de mener des recherches sur des options techniques innovantes en matière d'entreposage. Le cahier des charges que l'Andra s'était fixé résultait d'une analyse de la complémentarité entre l'entreposage et le stockage réversible : durée de vie et robustesse des installations augmentées (une durée d'exploitation jusqu'à une centaine d'années a été considérée), capacité à accueillir une plus grande diversité de colis de déchets, y compris sous la forme de colis de stockage, renforcement de la surveillance des installations et des colis de déchets entreposés.

Les recherches fondées sur ce cahier des charges ont été effectuées jusqu'à la fin de l'année 2012 ; le point d'arrêt intermédiaire à fin 2009 a permis de valider les orientations techniques proposées et de décider, dans le cadre du PNGMDR, de poursuivre les recherches dans la continuité.

En matière d'ingénierie, l'Andra a associé à ces recherches les groupes Areva et Tractebel, sélectionnés après appels d'offres. En matière scientifique, les recherches se sont focalisées principalement sur la durabilité des matériaux et sur les moyens de surveillance, en les reliant à celles menées en soutien au projet Cigéo compte tenu de la proximité des objectifs.

Une large gamme de solutions d'ingénierie a été explorée, comprenant notamment des installations souterraines à faible profondeur.

La comparaison entre installations en surface (ou enterrées en tout ou partie avec une réalisation à ciel ouvert) et installations réalisées en souterrain a fait apparaître une plus grande complexité des secondes, sans contrepartie notable en matière de robustesse : difficulté accrue de mise en place d'une convection naturelle pour la ventilation, nécessité de protection de l'entrepôt vis-à-vis de l'eau souterraine, augmentation du nombre de ruptures de charges pour les manutentions... Ce diagnostic spécifique à des installations d'entreposage visant à des fonctions comparables ne s'applique pas à la comparaison entre une installation d'entreposage en surface et une installation de stockage en profondeur : si la première est effectivement plus simple et de moindre coût, elle ne permet de gérer les colis de déchets de manière sûre que sur une durée d'un siècle au plus, alors que la seconde apporte une solution définitive à la gestion à long terme.

Les options techniques qui ont été sélectionnées par étapes et qui ont fait au final l'objet d'études d'optimisation montrent qu'il est possible de conférer à de futurs entrepôts, si nécessaire, une plus grande polyvalence vis-à-vis des colis de déchets, au moyen de casiers ou de canisters : l'accueil de colis de dimensions et de masses très différentes (par exemple colis primaires et colis de stockage) n'entraîne alors qu'une modification des casiers sans impacter le bâtiment.

Un accent a été également été mis sur l'amélioration de la surveillance des colis de déchets et du vieillissement des structures d'entreposage. Des périodes d'entreposage de plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années peuvent ainsi être mises à profit pour recueillir des informations sur le comportement et l'évolution de lots de colis (puissance thermique, dégagement de gaz de radiolyse ou radioactifs).

Parallèlement à la recherche d'options techniques innovantes, l'Andra s'est rapprochée des exploitants nucléaires d'entrepôts pour prendre en compte leur retour d'expérience sur les installations en exploitation (CEDRA…) et pour échanger sur les projets en phase de conception ou de réalisation : E-EV-LH (La Hague), ICEDA (Bugey), DIADEM (Marcoule).

Dans le cas particulier de E-EV-LH, un travail important a été réalisé par l'Andra et Areva pour intégrer les avancées des recherches dans la conception de cette installation. Ce travail permet d'envisager une durée de vie accrue de l'installation.

10.3 Perspectives

Au terme de six années d'études et de recherches sur l'entreposage menées conformément à la loi du 28 juin 2006, l'Andra propose de poursuivre les actions en la matière selon quatre volets.

10.3.1 Optimisation des scénarios de gestion entreposage-transport-stockage

Comme indiqué plus haut, le travail sur l'optimisation des scénarios de gestion entreposage-transport-stockage des colis de déchets HA et MAVL devra se poursuivre pour utiliser au mieux les installations d'entreposage existantes ou en projet, justifier les besoins en nouvelles installations d'entreposage et logistiques et optimiser l'exploitation de Cigéo.

Ce travail nécessitera une concertation étroite entre les acteurs dans la continuité des actions engagées et devrait privilégier une compréhension partagée des différents enjeux. En complément aux actions relevant (i) des producteurs de déchets pour ce qui concerne les installations dont ils sont maîtres d'ouvrage et exploitants et (ii) de l'Andra en tant que maître d'ouvrage du projet Cigéo, l'Andra propose de poursuivre une analyse globale de la gestion des déchets afin d'identifier des pistes d'optimisation et de formuler des suggestions qui pourront être débattues entre les acteurs. Cette analyse prendra en compte les travaux menés en parallèle sur les déchets rattachés à la catégorie FAVL.

10.3.2 Accompagnement de l'extension d'installations existantes ou de la création de nouvelles installations.

Les études d'options d'ingénierie menées depuis 2007 se sont caractérisées par leur caractère générique vis-à-vis des colis à prendre en compte et du site d'implantation. Elles ont permis d'identifier diverses innovations qui pourraient s'appliquer à de nouvelles installations implantées sur les sites de conditionnement des déchets. A ce stade, approfondir la conception d'ingénierie de futurs entrepôts dans un cadre générique ne devrait plus apporter d'avancées significatives.

En revanche la coopération entre Areva et l'Andra sur l'extension de l'entreposage de déchets vitrifiés à La Hague a montré l'intérêt d'actions concertées visant à intégrer les résultats des recherches aux projets d'extension d'installations existantes ou de création de nouvelles installations. Au-delà de simples échanges, il est envisageable d'entreprendre des programmes complémentaires d'études et de recherches appliqués à ces projets pour approfondir les pistes d'amélioration envisageables. Il s'agira alors de prendre en compte, au cas par cas, le site concerné, un ensemble plus ou moins étendu de familles de colis de déchets et plus généralement les contraintes et objectifs exprimés par le maître d'ouvrage.

Sans préjudice de la responsabilité de ce dernier en matière de choix techniques, ces actions concertées pourront apporter une contribution à l'établissement des cahiers des charges des projets.

L'Andra proposera à chaque maître d'ouvrage et futur exploitant de projet d'entreposage de mettre en place de telles actions. Elle recueillera les besoins qu'ils pourront exprimer.

10.3.3 Support scientifique

En matière scientifique les recherches définies en 2007 puis en 2009, généralement dans un cadre partagé avec le stockage[216] pourront être adaptés aux besoins des projets industriels.

Vis-à-vis d'un objectif de durabilité, les processus généraux de l'évolution phénoménologique d'un entreposage sont qualitativement bien identifiés (chapitre 8). Toutefois une quantification des processus n'est possible que si l'environnement de l'entreposage et les systèmes qui le composent sont suffisamment connus. Ainsi l'Andra pourra proposer une quantification par la modélisation dans le cadre des projets industriels.

Les principaux axes des recherches engagées par l'Andra concernent les aspects suivants :

- Le vieillissement des structures et conteneurs en béton : carbonatation en milieux non saturés et en température, fluage des bétons en température, transferts gazeux et aqueux dans les matériaux cimentaires non saturés, dégâts physico-chimiques liés aux irradiations ;
- Le vieillissement des structures et conteneurs métalliques : corrosion atmosphérique (description des cinétiques, faciès de corrosion, prise en compte des espèces corrosives formées par radiolyse), modélisation couplée corrosion/mécanique ;
- La simulation thermo-hydro-aéraulique : en ventilation par thermoconvection naturelle, les phénomènes mis en jeu peuvent être complexes à modéliser à l'échelle de l'ouvrage (convection naturelle avec des forts gradients de température - convection non Boussinesq -, phénomène de relaminarisation, modèles de turbulences, échanges thermiques) pouvant motiver le développement et l'utilisation d'outils numériques mieux adaptés et si besoin la réalisation d'expériences de démonstration et de qualification (maquettes) des modèles utilisés, dans des conditions en similitude avec les installations envisagées.
- Les systèmes d'auscultation pour l'observation et la surveillance des installations et des colis.

Le programme d'auscultation d'ouvrages industriels anciens, proposé dès 2009, sera poursuivi : des échantillons de bétons prélevés dans l'usine Georges Besse I sont ainsi en cours d'analyse.

10.3.4 Etudes prospectives sur l'entreposage en soutien à la réversibilité du stockage

De manière plus prospective compte tenu de la temporalité, l'Andra propose de poursuivre des études et recherches sur l'entreposage de colis de déchets qui seraient retirés du stockage dans le cadre de la réversibilité. Ces études et recherches pourront conserver un caractère générique vis-à-vis de la localisation des installations. Elles s'étendront au transport des colis de déchets récupérés dans l'hypothèse d'un entreposage sur un site autre que Cigéo.

[216] Pour les installations d'entreposage des colis de déchets HA ou MAVL, les mécanismes d'évolution sur le long terme des composants sont du même type que ceux rencontrés dans le stockage géologique profond, particulièrement pour sa phase d'exploitation (carbonatation atmosphérique, corrosion sèche, etc.). Cependant les domaines de température et d'hygrométrie ainsi que les environnements chimiques sont souvent différents.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1/7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00 / www.andra.fr

©Andra • 501 • DCOM 13-0019 • Janvier 2013 • 50 exemplaires • Conception graphique et réalisation : Pascal Lemercier • Gratuit - Ne peut être vendu.