Stockage réversible profond

ÉTAPE 2009

OPTIONS DE SÛRETÉ DU STOCKAGE EN FORMATION GÉOLOGIQUE PROFONDE

ANDRA
La maîtrise des déchets radioactifs

COUVERTURE

Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde

SOMMAIRE

Sommaire 3

Tables des illustrations 6

1. Démarche de sûreté et Données d'entrées 13

1.1 Contexte et Objet du document 14

1.2 Un Dossier 2005, des acquis, des évolutions de conception pour réduire les risques et répondre aux demandes des évaluateurs et du débat public 16

1.2.1 Les acquis du Dossier 2005 16
1.2.2 Les évolutions depuis le Dossier Argile 2005 21

1.3 Une démarche itérative du développement d'un stockage 23

1.3.1 La démarche itérative de conception 23
1.3.2 Les étapes de conception et de développement du stockage 24
1.3.3 2009 : une nouvelle itération entre conception/science et sûreté et une première étape vers le choix de site 25
1.3.4 Une conception de stockage modulaire permettant un développement par étapes en raison de la durée d'exploitation prévue pour le stockage et de la demande de réversibilité 26

1.4 Principes généraux guidant la sûreté 27

1.5 La démarche de sûreté 30

1.5.1 Description de la démarche 30
1.5.2 Une gestion coordonnée des risques en exploitation et à long terme 32
1.5.3 Démarche relative à la biosphère 38
1.5.4 La mise en œuvre du principe de défense en profondeur 41
1.5.5 Prise en compte de la demande de réversibilité 43
1.5.6 La gestion de la mémoire compte tenu des échelles de temps (exploitation et après fermeture) 44

1.6 Les données d'entrées 46

1.6.1 Références externes applicables 47
1.6.2 Objectifs de protection en phase exploitation vis-à-vis du risque radiologique 52
1.6.3 Objectif de protection en phase après fermeture vis à vis du risque radiologique 54
1.6.4 Objectif de protection vis-à-vis des toxiques chimiques 55
1.6.5 Objectifs de protection vis-à-vis des gaz de radiolyse 56
1.6.6 Objectifs de protection vis-à-vis du risque de criticité 56
1.6.7 Le modèle d'inventaire des colis de déchets 58
1.6.8 Les caractéristiques des déchets 67
1.6.9 Les colis de stockage 75
1.6.10 Le site et l'implantation des installations 75
1.6.11 Les installations 80
1.6.12 Les fonctions de sûreté 83

2. Options de sûreté des installations de surface 93

2.1 Préambule 94

2.2 Présentation des installations et de leur environnement 94

2.2.1 Environnement du site 94
2.2.2 Implantation des installations de surface 97

2.2.3 Description des colis de déchets réceptionnés et conditionnés dans les installations de surface 102
2.2.4 Description des installations nucléaires de surface de la zone « descenderie » 111
2.2.5 Fonctionnement des installations nucléaires de surface de la zone « descenderie » 114
2.3 Maitrise des risques 123
2.3.1 Risques d'origine nucléaire 123
2.3.2 Risques non nucléaires d'origine interne 135
2.3.3 Risques d'origine externe 145
2.3.4 Risques spécifiques à la durée d'exploitation 157
2.4 Situations de dimensionnement 157
2.4.1 Situations de dimensionnement 158
2.4.2 Situations hors dimensionnement 158
2.5 Dispositions adoptées en vue du démantèlement 159
2.6 Gestion des déchets et des effluents 159
2.6.1 Recensement des déchets et effluents générés par les installations 159
2.6.2 Gestion des déchets 159

3. Options de sûreté des installations souterraines en phase exploitation 161

3.1 Préambule 162
3.2 Rappel des principes fondateurs de l'analyse de sûreté 163
3.3 Options de sûreté et de conception des installations 164
3.3.1 Les colis de stockage 164
3.3.2 Les hottes de radioprotection 171
3.3.3 Les ouvrages de liaison surface/fond 174
3.3.4 La zone centrale et les infrastructures de liaison 175
3.3.5 La zone de stockage des colis MAVL 177
3.3.6 La zone de stockage des colis HA de déchets vitrifiés fortement exothermiques 181
3.3.7 Modules de stockage des colis HA de déchets vitrifiés moyennement exothermiques (C0) et de combustibles usés CU3 186
3.3.8 L'architecture générale 187
3.3.9 La ventilation 189
3.3.10 Les systèmes de transfert des colis par hotte depuis la surface jusqu'au niveau du stockage 194
3.3.11 Les systèmes de transfert des hottes de la zone centrale jusqu'à la zone de stockage 198
3.3.12 Les systèmes de transfert des hottes dans la zone de stockage jusqu'à l'alvéole de stockage 199
3.3.13 Les systèmes de mise en alvéole des colis HA 200
3.3.14 Les systèmes de mise en alvéole des colis MAVL 202
3.4 Maîtrise des risques 206
3.4.1 Rappel de la méthodologie 206
3.4.2 Risques d'origine nucléaire 207
3.4.3 Risques non nucléaires d'origine interne 226
3.4.4 Risques non nucléaires d'origine externe 243
3.4.5 Risques spécifiques aux installations du stockage 247
3.5 Situations de dimensionnement et hors dimensionnement 249
3.5.1 Situations de dimensionnement 249
3.5.2 Situations hors dimensionnement 251
3.6 Dispositions adoptées en vue de la fermeture des installations 251

3.7 Gestion des déchets et effluents 252
3.7.1 Effluents liquides 252
3.7.2 Effluents gazeux 253
3.7.3 Déchets solides 253
3.7.4 Gestion des déchets 253

4. Options de sûreté des installations souterraines en phase après fermeture 255

4.1 Préambule 256
4.2 Rappel de la démarche 257
4.3 Options de sûreté après fermeture et de conception des installations souterraines 258
4.3.1 Fonctions de sûreté 258
4.3.2 Colis de stockage 259
4.3.3 Le milieu géologique 263
4.3.4 Architecture des installations souterraines 266
4.3.5 Ouvrages de liaison et leurs scellements 278
4.4 Maîtrise des incertitudes et robustesse du stockage 283
4.4.1 Connaissance du milieu géologique 284
4.4.2 Les colis de déchets 287
4.4.3 Les phénomènes régissant l'évolution interne du stockage 289
4.4.4 La connaissance des transitoires et des couplages 298
4.4.5 Incertitudes sur l'évolution à long terme des matériaux 302
4.4.6 Incertitudes sur les phénomènes de transport 305
4.4.7 Incertitudes technologiques 307
4.4.8 Incertitudes sur la durée et les modalités de la phase d'exploitation et d'observation 308
4.4.9 Evénements externes 311
4.4.10 Synthèse 311
4.4.11 Perspectives pour réduire les incertitudes résiduelles 312
4.4.12 Observations et surveillance après la phase de fermeture 313
4.5 Scénarios 314
4.5.1 Scénarios du Dossier 2005 315
4.5.2 Scénarios pris en compte pour l'étude des évolutions de conception entre 2005 et 2009 316
4.5.3 Scénarios à prendre en compte pour la DAC 2014 320
4.6 Performances à long terme des options de conception au stade de 2009 323
4.6.1 Démarche d'analyse du bon fonctionnement des options de conception 323
4.6.2 Implantation du groupe de puits principal et sensibilité à la présence de puits de retour d'air (analyse pour la zone HA) 327
4.6.3 Ajout d'une descenderie double-tube 331
4.6.4 Organisation de la zone MAVL 333
4.6.5 Augmentation de la longueur des alvéoles MAVL et réduction de leur diamètre 338
4.6.6 Réduction du nombre de galeries par faisceau et évolution du nombre de modules 340
4.6.7 Modélisation combinatoire des options 342
4.6.8 Evaluation des conséquences du positionnement dans la zone de transposition 346
4.6.9 Résumé des évaluations quantitatives 349

Références bibliographiques 351

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1.2-1	Illustration du Dossier 2005 montrant la capacité de la roche hôte à retenir les actinides	17
Figure 1.2-2	Illustration (cas du scénario d'évolution normale du Dossier Argile 2005) montrant la capacité du stockage et du Callovo-Oxfordien à retenir la majorité des radionucléides	21
Figure 1.3-1	La démarche itérative de conception du stockage	24
Figure 1.3-2	Exemple de développement progressif de la zone MAVL	27
Figure 1.4-1	Illustration de gestion de la co-activité	30
Figure 1.5-1	Schéma illustrant la démarche de sûreté mise en œuvre pour toutes les phases de vie de l'installation	32
Figure 1.5-2	Les différentes étapes de l'analyse de risques	34
Figure 1.5-3	Selon la période radioactive du radionucléide et son comportement en solution (radionucléides et toxiques) : des indicateurs représentatifs de leur mode de gestion.	38
Figure 1.5-4	Schéma illustrant les différentes étapes de choix et de description d'une biosphère	41
Figure 1.6-1	Illustration de colis HA	59
Figure 1.6-2	Illustration de colis MAVL (Fût EIP et Conteneur 870 l du CEA)	62
Figure 1.6-3	Délimitation de la zone privilégiée pour implanter la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) : partie blanche au sein de la zone de transposition, et ZIRA proposée par l'Andra	77
Figure 1.6-4	Illustration d'un découplage des installations	78
Figure 1.6-5	Carte de synthèse des contraintes de surface (Andra, 2009f)	79
Figure 1.6-6	Proposition de scénarios d'implantation en surface à étudier (en violet) compatibles avec la ZIRA proposée	80
Figure 1.6-7	Les différentes installations du futur centre de stockage	81
Figure 1.6-8	Exemple d'architecture de stockage	83
Figure 2.2-1	Périmètre d'implantation possible des installations de surface	95
Figure 2.2-2	Carte de synthèse des principales contraintes de sûreté pour implanter les installations nucléaires de surface	98
Figure 2.2-3	Illustration d'un découplage des installations du centre de stockage	99
Figure 2.2-4	Schéma des installations de surface de la zone « puits »	100
Figure 2.2-5	Schéma des installations de surface de la zone « descenderie »	102
Figure 2.2-6	Colis PIVER	103
Figure 2.2-7	Colis de l'AVM	103
Figure 2.2-8	Colis de stockage de déchets HA et CU3	104
Figure 2.2-9	Schéma du colis de stockage HA de type AVM (colis C0.3 du MID 2009)	105
Figure 2.2-10	Conteneur standard inox	106
Figure 2.2-11	Colis standard de déchets compactés (CSD-C)	106
Figure 2.2-12	Système de fixation du couvercle des colis de stockage MAVL	107
Figure 2.2-13	Colis de stockage MAVL adapté à manutention « individuelle »	108
Figure 2.2-14	Colis de stockage MAVL adapté à manutention « après pré-empilage »	108
Figure 2.2-15	Illustration d'un agencement possible du bâtiment de réception, contrôle et conditionnement des colis	114
Figure 2.2-16	Agencement des locaux de traitement des colis	115
Figure 2.2-17	Synoptique des opérations effectuées dans le hall de réception des emballages	116
Figure 2.2-18	Synoptique des opérations de déchargement des colis primaires et d'évacuation des emballages vides	116

Figure 2.2-19 Synoptique des opérations de conditionnement des colis primaires MAVL en colis de stockage 117
Figure 2.2-20 Synoptique des opérations de conditionnement des colis primaires HA en colis de stockage 118
Figure 2.2-21 Synoptique des opérations de mise en hotte des colis de stockage MAVL 118
Figure 2.2-22 Synoptique des opérations de mise en hotte des colis de stockage HA 119
Figure 2.2-23 Schéma de concept d'entreposage en puits 120
Figure 2.2-24 Schéma de concept d'entreposage en bâtiment multi-étagé 120
Figure 2.2-25 Schéma de concept d'entreposage en casemates modulaires en béton sur radier 121
Figure 2.2-26 Schéma de concept d'entreposage en rayonnage par transstockeur à satellite 122
Figure 2.2-27 Schéma de concept d'entreposage sur longrines par chariots navettes 122
Figure 2.3-1 Carte des zones sismiques (dépassement du spectre forfaitaire imposé par la RFS 2001-01) 147
Figure 2.3-2 Carte des risques de chute d'avion 148
Figure 2.3-3 Carte des stations météorologiques existantes à proximité du secteur d'étude 150
Figure 2.3-4 Carte des densités de foudroiement (impacts/km^2/an) par commune 152
Figure 2.3-5 Carte des zones à risque d'inondation 153
Figure 2.3-6 Carte des installations à risques, des voies de communication et de transport d'énergie 154
Figure 3.3-1 Colis de stockage associé à une manutention « individuelle » (à gauche) et Colis de stockage associé à une manutention « avec pré-empilage » (à droite) 166
Figure 3.3-2 Colis de stockage avec couvercle coiffant (à gauche) et Colis de stockage sans logements internes (à droite) 166
Figure 3.3-3 Exemple de « colis de stockage standard » : conteneur optimisé (à gauche) et conteneur standardisé de mêmes dimensions externes (à droite) 167
Figure 3.3-4 Colis de stockage HA de déchets vitrifiés 170
Figure 3.3-5 Colis de stockage HA de combustibles usés CU3 171
Figure 3.3-6 Hotte de transfert des colis HA (avec système externe de mise en alvéole des colis et ouverture rotative) 173
Figure 3.3-7 Hotte pour colis MAVL de type B4 174
Figure 3.3-8 Ensemble de la zone centrale 177
Figure 3.3-9 Module de stockage MAVL 178
Figure 3.3-10 Organisation de la zone de stockage des déchets MAVL (scénario de base) 180
Figure 3.3-11 Organisation de la zone de stockage des déchets HA (scénario de base) 183
Figure 3.3-12 Alvéole HA en cours de remplissage 184
Figure 3.3-13 Alvéole HA fermée 185
Figure 3.3-14 Agencement d'un module d'exploitation HA 186
Figure 3.3-15 Organisation de la zone de stockage des déchets C0 et des combustibles usés CU3 (scénario de base) 187
Figure 3.3-16 Vue 3D du stockage (scénario de base) 188
Figure 3.3-17 Vue en plan du stockage (scénario de base) 189
Figure 3.3-18 La ventilation de l'architecture du stockage 192
Figure 3.3-19 Schéma de ventilation 193
Figure 3.3-20 Véhicules de transfert en descenderie des hottes MAVL (à gauche) et des hottes HA (à droite) 195
Figure 3.3-21 Principes de conception d'un funiculaire de transfert de hottes HA et MAVL 197
Figure 3.3-22 Exemples d'une navette de transfert HA sur rails 200
Figure 3.3-23 Systèmes de mise en alvéole des colis HA 202
Figure 3.3-24 Système de mise en place des colis MAVL après pré-empilage 204
Figure 3.3-25 Mise en place individuelle des colis MAVL avec le stockeur 205
Figure 3.3-26 Mise en place individuelle des colis MAVL avec le pont gerbeur 206

Figure 3.4-1 Illustration d'un module MAVL équipé d'une ventilation nucléaire de type C2 211
Figure 3.4-2 Fermeture de l'alvéole MAVL, mise en place du massif d'appui 225
Figure 3.4-3 Fermeture de l'alvéole MAVL, mise en place du mur de protection radiologique 225
Figure 3.4-4 Illustration des zones présentant un risque d'incendie élevé 227
Figure 3.4-5 Incendie dans une galerie de transfert MAVL (à gauche) et Incendie dans une galerie d'accès HA (à droite) 229
Figure 3.4-6 Incendie d'un véhicule de transfert dans la galerie de transfert HA (à gauche) et Incendie de la navette de transfert dans une galerie d'accès (à droite) 231
Figure 3.4-7 Incendie dans une alvéole de stockage MAVL 231
Figure 3.4-8 Synthèse des zones à risques de chute/collision 233
Figure 3.4-9 Séparation des circuits d'exploitation et de travaux environ 30 années après la mise en service industrielle du stockage 242
Figure 4.1-1 Schémas illustrant l'évolution des architectures à terminaison entre 2005, scénario 1a (à gauche) et 2009 (à droite) pour le scénario de base. 257
Figure 4.3-1 Schéma illustrant un colis de stockage de déchets HA 261
Figure 4.3-2 Schéma illustrant un colis de stockage de déchets MAVL associé à une manutention « individuelle » 263
Figure 4.3-3 Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute-Marne (Andra, 2009g) 265
Figure 4.3-4 Schémas illustrant des architectures à terminaison pour le scénario de base (à gauche) et pour le scénario de dimensionnement (à droite). 269
Figure 4.3-5 Représentation schématique des installations souterraines à terminaison 271
Figure 4.3-6 Représentation schématique de la zone HA 272
Figure 4.3-7 Représentation schématique de la zone MAVL 273
Figure 4.3-8 Position de l'alvéole MAVL dans la couche d'argilite (Andra, 2009c) 275
Figure 4.3-9 Exemples d'arrangement de colis de stockage dans une alvéole MAVL de section de 8 – 9 m 275
Figure 4.3-10 Représentation schématique d'une alvéole de déchets MAVL selon une coupe longitudinale. 276
Figure 4.3-11 Schéma illustrant une coupe longitudinale d'alvéole de déchets HA, incluant les bouchons métalliques, d'argile et de béton. 278
Figure 4.3-12 Représentation schématique du stockage et des liaisons jour-fond 280
Figure 4.3-13 Coupe schématique d'un scellement de puits 281
Figure 4.3-14 Représentation schématique d'un scellement de galerie (Andra, 2009c) 283
Figure 4.4-1 Schéma conceptuel de l'EDZ lié au déconfinement de la paroi et schéma conceptuel des fractures de cisaillement observées dans le laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne 292
Figure 4.5-1 Schéma représentant le lien entre fonctions de sûreté et scénarios d'évolution altérée (figure à revoir) 316
Figure 4.5-2 Représentation schématique du défaut de scellement de puits (à droite) et du défaut de scellement de galerie (à gauche). 318
Figure 4.6-1 Rappel de l'architecture du Dossier 2005 et figuration des zones de stockage et des catégories de déchets considérées pour l'analyse comparative des options du jalon 2009. 326
Figure 4.6-2 Schémas de principe des architectures de stockage HA-MAVL à puits groupés décentrés (Dossier 2005) et à puits groupés centrés (Dossier 2009). 328
Figure 4.6-3 Historiques de débits molaires HA C3+C4 (C6) à 1 Ma du Dossier 2005 (puits groupés décentrés). SEA « tous scellement défaillants » (gradient vertical ascendant 0,2 m/m, gradient horizontal nul, sortie Callovo-Oxfordien = toit + mur, terme source verre pénalisant). 328
Figure 4.6-4 Historiques de débits molaires C3+C4 (C6) à 1 Ma du Dossier 2005 (puits groupés décentrés). SEA « tous scellement défaillants » (gradient vertical

ascendant 0,4 m/m, gradient horizontal nul et gradient horizontal 0,014 m/m). 329

Figure 4.6-5 Coupes verticales schématiques montrant les gradients hydrauliques considérés pour la simulation de l'effet d'une descenderie et sa conceptualisation sous forme d'un ouvrage composite galerie – puits. 331

Figure 4.6-6 Représentation du calcul Zone HA C3-C4 (C6) à puits centrés groupés et descenderie placés en aval relativement au gradient horizontal (parallèle aux galeries de liaison principales). 332

Figure 4.6-7 Rappel des historiques de débits molaires B1x à 1 Ma du Dossier 2005 (puits groupés décentrés) pour le SEA « tous scellement défaillants » (gradient montant 0,2 m/m, gradient horizontal nul). 334

Figure 4.6-8 Configurations de la zone MAVL : puits groupés centrés du dossier 2005 (haut gauche), alvéoles passantes avec 2 puits de retour d'air éloignés (haut droite), alvéoles passantes avec 2 puits de retour d'air proches (bas gauche), alvéoles passantes avec 1 puits de retour d'air central peu dégroupé (bas droite). 335

Figure 4.6-9 Zone MAVL avec puits de retour d'air unique peu dégroupé (référence jalon 2009). Historiques de débit molaires de l'iode 129 pour les déchets B1x (^{129}I). Débits entrant et sortant. Situation avec gradient horizontal de 0,014 m/m parallèle aux galeries de liaison principales et puits de retour d'air en amont, gradient vertical montant 0,4 m/m. 336

Figure 4.6-10 Sensibilité au diamètre des puits de retour d'air d'une zone MAVL - Historiques de débit molaires pour les déchets B1x (^{129}I) - Architecture à puits de retour d'air distants. (Situation avec gradient horizontal de 0,014 m/m parallèle aux galeries de liaison secondaires et puits de retour d'air en aval. Gradient vertical montant 0,4 m/m.) 337

Figure 4.6-11 Coupe schématique des alvéoles MAVL passantes considérées pour les calculs. 338

Figure 4.6-12 Comparaison des historiques de débit molaire sortant de différents gabarits d'alvéoles MAVL pour une source unitaire d'iode 129 (BG saine = Callovo-Oxfordien, gradient vertical 0,2 m/m). REF 2005 : alvéole de 250 m borgne. Référence : alvéole de 250 m passante. Intermédiaire : alvéole jalon 2009 de 450 m passante. (Monocolis : piste d'optimisation à 800 m.) 339

Figure 4.6-13 Historiques de débits molaires de l'iode 129 pour les déchets B1x. (Alvéole « référence » : 250 m passante. Alvéole « intermédiaire » : 400 m passante. (SEA tous scellements défaillants, puits de retour d'air unique, gradient vertical ascendant 0,4 m/m, gradient horizontal 0,014 m/m de la zone MAVL1 vers la zone MAVL2) 340

Figure 4.6-14 Comparaison des historiques de débit molaire en iode 129 sortant des puits et des scellements de zones en fonction du nombre de galeries de liaison secondaires et du nombre de modules par sous-zone HA. (Gradient horizontal 0,2 m/m orienté vers le puits groupés). 341

Figure 4.6-15 Comparaison des historiques de débit molaire en iode 129 sortant des puits en fonction du nombre de galeries de liaison secondaires de zones MAVL. (Puits de retour d'air MA unique peu dégroupé, gradient vertical 0,4 m/m, gradient horizontal vers les puits) 342

Figure 4.6-16 Représentation du maillage utilisé pour la modélisation combinée de l'ensemble des évolutions de conception relatives au jalon 2009 (Architecture « SB »). 343

Figure 4.6-17 Exemple de fonctionnement hydraulique d'ensemble du stockage pour le SEA tous scellements défaillants : cartographie des charges hydrauliques et des lignes de courant associées. (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m. Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone MAVL 1 vers la zone MAVL 2). 344

Figure 4.6-18 Architecture « SB ». Historiques de débits molaires de l'iode 129 – SEA tous scellements défaillants - (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m.

	Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone MAVL vers la zone HA). L'ensemble des puits draine de l'eau en provenance de la zone MAVL.	344
Figure 4.6-19	Architecture SB. Historiques de débits molaire de l'iode 129 – SEA tous scellements défaillants - (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m. Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone HA vers la zone MAVL). Le puits « retour d'air MAVL » draine de l'eau en provenance de la zone MAVL, les trois autres puits de l'eau provenant de la zone HA.	345
Figure 4.6-20	Comparaison des architectures « SB » (à gauche) et « SD » (à droite). Historique de débit molaire de l'iode 129 – SEA tous scellements défaillants - (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m. Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone MAVL1 vers la zone MAVL2).	346
Figure 4.6-21	Carte des cinq localisations retenues pour l'évaluation de la performance de confinement du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition (en rouge).	347
Figure 4.6-22	Profils de perméabilités retenus pour l'évaluation de la performance de confinement dans la zone de transposition.	348

Tableaux

Tableau 1.2-1	Rappel du bilan relatif aux risques radiologiques liés au stockage au stade du Dossier 2005 (Andra, 2005b)	19
Tableau 1.5-1	Niveaux de défense en profondeur	41
Tableau 1.6-1	Guides et référentiels de sûreté mis en œuvre	48
Tableau 1.6-2	Valeurs limitées d'exposition de la zone non réglementée et des différentes zones réglementées (réf. Arrêté de 15 mai 2006)	53
Tableau 1.6-3	Objectifs de protection vis-à-vis des risques radiologiques	54
Tableau 1.6-4	Périmètres des analyses de criticité	57
Tableau 1.6-5	Critères d'admissibilité proposés à ce stade des études pour les différentes situations	57
Tableau 1.6-6	Synthèse des colis types HAVL du modèle d'inventaire 2009	60
Tableau 1.6-7	Synthèse des colis types combustibles usés du modèle d'inventaire 2009	61
Tableau 1.6-8	Synthèse des caractéristiques des colis type retenus pour les risques d'origine nucléaire	69
Tableau 1.6-9	Synthèse des caractéristiques des colis type retenus pour les risques non nucléaires d'origine interne	72
Tableau 1.6-10	Synthèse des caractéristiques des colis type retenus pour les risques à long terme	73
Tableau 1.6-11	Tableau récapitulatif des fonctions et dispositions (en phase d'exploitation)	86
Tableau 1.6-12	Tableau récapitulatif des fonctions et dispositions (en phase après fermeture)	88
Tableau 2.2-1	Hypothèses de mise en conteneur de stockage des colis type MAVL retenues au stade actuel des études	109
Tableau 2.3-1	Exemple de classification des types de ventilation, en fonction du nombre de limite dérivée de concentration dans l'air (LDCA), comparaison avec la classification des zones de confinement	126
Tableau 2.3-2	Synthèse des classes de confinement et types de ventilation dans les zones principales de l'installation nucléaire de surface définies au stade actuel des études	127
Tableau 2.3-3	Zonage radiologique des locaux principaux de l'installation nucléaire de surface au stade actuel des études	129

Tableau 2.3-4	Spectre minimal forfaitaire imposé par la RFS 2001-01 à appliquer dans le secteur de Meuse/Haute-Marne	146
Tableau 2.3-5	Variabilité spatiale des accélérations sur la zone de transposition obtenue avec l'application du modèle sismotectonique par failles MS3	146
Tableau 2.3-6	Classement des matières nucléaires en fonction de leur nature et de leur quantité - article R1333-70	155
Tableau 2.6-1	Zonage des déchets	160
Tableau 3.4-1	Classes de confinement et types de ventilation dans les différentes zones des installations de transfert et souterraines envisagées au stade actuel	210
Tableau 3.4-2	Débit d'équivalent de dose au contact des colis primaires	212
Tableau 3.4-3	Zonage radioprotection établi sur la base de la description actuelle des installations souterraines et de leur fonctionnement	215
Tableau 3.4-4	Situations envisagées pour chaque étape du procédé de transfert des hottes de la surface jusqu'aux alvéoles de stockage au stade actuel	234
Tableau 3.4-5	Mise en alvéole des colis MAVL	235
Tableau 3.4-6	Spectre minimal forfaitaire imposé par la RFS 2001-01 à appliquer dans le secteur de Meuse/Haute-Marne	243
Tableau 3.7-1	Classification du zonage déchets	254
Tableau 4.4-1	Modalités de gestion des incertitudes concernant le comportement hydraulique	290
Tableau 4.4-2	Modalités de gestion des incertitudes relatives au comportement mécanique	296
Tableau 4.4-3	Modalités de gestion des incertitudes résiduelles relatives aux effets thermiques	301
Tableau 4.4-4	Modalités de gestion des incertitudes relatives aux perturbations chimiques du stockage	304
Tableau 4.4-5	Modalités de gestion des incertitudes résiduelles relatives aux phénomènes de transport.	306
Tableau 4.4-6	Incertitudes résiduelles liées aux conditions d'exploitation	310
Tableau 4.5-1	Liste des études de sensibilités aux paramètres du Callovo-Oxfordien	317
Tableau 4.5-2	SEA défaut de scellements - Tableau résumant la liste des cas de calculs traités dans le Dossier 2005 (en normal). En gras, les scellements liés aux évolutions de conception (puits de retour d'air et descenderie).	320
Tableau 4.6-1	Rappel du SEA « tous scellements défaillants » puits groupés décentrés (Dossier 2005). Historique des débits molaires d'iode 129 sortant du Callovo-Oxfordien et débit d'eau par les puits. Cox : Callovo-Oxfordien.	329
Tableau 4.6-2	Calculs 2009 tous scellements défaillants avec puits groupés centrés – Effet des gradients verticaux et horizontaux sur les débits molaires et sur les débits d'eau sortant des puits.	330
Tableau 4.6-3	Comparaison des sorties C3+C4 (C6) d'iode 129 par les puits groupés ou la descenderie pour le SEA « tous scellements défaillants ».	332
Tableau 4.6-4	Comparaison des sorties par les puits groupés et par le(s) puits de retour d'air MAVL de l'iode 129 pour les configurations hydrauliques les plus défavorables. (GLS : galeries de liaison secondaires. GLP : galeries de liaison principale.)	335
Tableau 4.6-5	Comparaison des sorties B1x par le puits de retour d'air pour 3 diamètres de puits de retour d'air et de galerie de retour d'air (SEA « tous scellements défaillants »).	337
Tableau 4.6-6	Comparaison des sorties d'iode 129 par les puits pour 2 configurations d'alvéoles MAVL (SEA « tous scellements défaillants »).	340
Tableau 4.6-7	Valeurs des paramètres de diffusion retenus pour l'évaluation des performances de confinement dans la zone de transposition.	347
Tableau 4.6-8	Comparaison des sorties au toit du Callovo-Oxfordien pour des paramètres « formation hôte » spécifiques des différentes plateformes disponibles – Rappel du Dossier 2005 (SEN. C3 + C4)	348

Encadrés

Encadré 1.5-1 La conservation de la mémoire pour les centres de stockage de surface 45
Encadré 1.6-1 Rappel sur les notions de dose 51

1

Démarche de sûreté et Données d'entrées

1.1 Contexte et Objet du document 14
1.2 Un Dossier 2005, des acquis, des évolutions de conception pour réduire les risques et répondre aux demandes des évaluateurs et du débat public 16
1.3 Une démarche itérative du développement d'un stockage 23
1.4 Principes généraux guidant la sûreté 27
1.5 La démarche de sûreté 30
1.6 Les données d'entrées 46

1.1 Contexte et Objet du document

La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques.

La réponse apportée par un stockage consiste à confiner ces déchets dans une formation géologique profonde pour s'opposer à la dissémination des radionucléides qu'ils contiennent. Ce confinement s'effectue sur de grandes échelles de temps (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années), de manière passive, c'est-à-dire sans nécessiter à très long terme de maintenance ou de surveillance, comme le rappelle le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (ASN, 2008).

L'étude de la faisabilité d'un stockage de déchets HAVL en formation géologique profonde faisant l'objet du Dossier 2005 Argile (Andra, 2005a) et menée par l'Andra en s'appuyant sur les caractéristiques du site de Meuse/Haute-Marne s'est attachée à évaluer les conditions dans lesquelles on pourrait construire, exploiter, gérer de manière réversible, fermer, surveiller un site de stockage, puis le laisser évoluer sans aucune intervention humaine et sans qu'à aucun moment la sécurité des travailleurs, du public et la protection de l'environnement ne soient compromises. La sûreté est au centre de la démarche de choix de site et de conception du stockage.

Au terme des recherches réalisées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 (loi n° 91-1381), le Dossier 2005 (Andra, 2005a) remis par l'Andra a conclu à la faisabilité de principe d'un stockage réversible des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA-MAVL) dans la formation d'argilite du Callovo-Oxfordien étudiée au moyen du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Ce dossier a fait l'objet de plusieurs évaluations scientifiques et techniques : rapport global de la Commission nationale d'évaluation mise en place par la loi de 1991 (CNE, 2006) ; avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN, 2006) ; rapport de la revue internationale d'experts menée sous l'égide de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN, 2006) à la demande des ministères de tutelle de l'Andra.

Se fondant sur ces éléments, les résultats des autres axes de recherche qui avaient été mis en place en 1991, ainsi que les comptes-rendus du débat public sur la gestion des déchets radioactifs (CNDP, 2006), une loi de programme sur la gestion durable des déchets radioactifs a été promulguée le 28 juin 2006 (loi n°2006-739). Cette loi stipule que « *après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou à faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* » et confie à l'Andra « *de réaliser ou faire réaliser conformément au plan national prévu à l'article L. 542-1-1* [du code de l'environnement]*, des recherches et études sur l'entreposage et le stockage en couche géologique profonde et d'assurer leur coordination* ».

Concernant le stockage réversible en couche géologique profonde, prenant acte de la faisabilité du stockage sur le site selon le concept étudié par l'Andra, la loi précise que « *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 (…) La demande d'autorisation de création doit concerner une couche géologique ayant fait l'objet d'études au moyen d'un laboratoire souterrain* ».

Le décret du 16 avril 2008 (décret n°2008-357 pris pour l'application de l'article L.542-1-2 du code de l'environnement et fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs) fixe des étapes intermédiaires qui sont :

- d'ici fin 2009, la proposition par l'Andra aux ministres chargés de l'énergie, de la recherche et de l'environnement, « d'une zone d'intérêt restreinte propice à l'implantation d'un stockage, sur laquelle seront mises en œuvre des techniques d'exploration approfondies »,

- d'ici fin 2012, la remise du dossier servant de support à l'organisation du débat public prévu par l'article L.542-10-1 du code de l'environnement, comprenant notamment une proposition pour un site d'implantation du stockage géologique,
- d'ici fin 2014, la remise du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) du centre de stockage.

Pour présenter dans le dossier du débat public les caractéristiques principales de l'ensemble des installations projetées, il convient de fixer les options de sûreté pour les phases d'exploitation et après fermeture que l'Andra envisage pour préparer le dossier de la demande d'autorisation de création (DAC). Le présent document a donc pour principal objectif de présenter les options de sûreté retenues au stade actuel de la conception, en particulier l'architecture des installations, les éléments de description des solutions techniques envisagées et les principes d'exploitation, nécessaires à la maîtrise des risques d'origines interne et externe et des incertitudes à long terme pouvant conduire à des conséquences radiologiques et tenant compte notamment :

- des recommandations des experts nationaux et internationaux (par exemple en matière de gestion des gaz) relatives au Dossier 2005 et formulées en 2006,
- des avancées de la connaissance scientifique et technologique (acquisitions scientifiques, démonstrateurs, expérimentations en surface et en laboratoire souterrain (Andra, 2009g).

Les options de conception considérées au stade actuel présentent par rapport à celles du Dossier Argile 2005 des évolutions qui sont de deux ordres. Il s'agit :

- d'optimisations de la conception ou des modalités d'exploitation (procédé et processus d'exploitation, équipements…) pour répondre aux exigences de sûreté pour réduire la probabilité d'occurrence et/ou la gravité de certains risques, notamment les risques nucléaires pouvant conduire à des conséquences radiologiques (ex : manutention des colis de stockage MAVL en alvéole),
- d'optimisations technico-économiques des dispositions du Dossier 2005 (exemple : longueur des alvéoles MAVL).

Certaines de ces nouvelles dispositions impliquent une évolution significative par rapport aux options de conception présentées dans le Dossier 2005 (ex : Alvéoles MAVL passantes).

En rapport avec la spécificité du centre de stockage qui comprend des installations de surface et souterraines et deux grandes phases de vie principales de son fonctionnement (exploitation réversible et après fermeture), ce document est constitué de quatre parties principales.

Une partie descriptive (présent chapitre) qui consiste en une présentation succincte du contexte, des données d'entrée. Notamment le principe d'une construction modulaire est abordé, et la démarche de sûreté est présentée :

Une partie relative à l'analyse des risques pour les installations de surface (présentée dans le chapitre 2) dont l'objectif est de présenter comment les risques d'origine interne (manutention, incendie..) et externes (séisme, chute d'avions) sont pris en compte en termes de dispositions (au niveau des choix de conception, de procédés, de surveillance). L'implication de la prise en compte des événements externes dans la zone de transposition de 250 km^2 sur un éventuel dimensionnement des installations de surface en particulier les locaux à risques est aussi synthétisée dans ce chapitre.

Une partie relative à l'analyse des risques pour les installations souterraines (y compris les liaisons surface-fond et les opérations de mise en place des colis de déchets jusqu'à la fermeture de l'installation) en phase d'exploitation réversible et faisant l'objet du chapitre 3. Les risques étudiés sont similaires à ceux des installations de surface à l'exception des risques d'origine externe ; la spécificité de cette installation en milieu souterrain et en particulier la co-activité entre la construction et l'exploitation au regard de la durée de l'exploitation est abordée.

Une partie d'analyse relative à l'analyse des risques après fermeture (chapitre 4) dont l'objectif est de décrire comment la localisation, les éléments constitutifs du stockage et son architecture permettent d'assurer une sûreté passive. La gestion des incertitudes est présentée dans ce chapitre en lien avec les

solutions techniques envisagées et l'avancée de la connaissance scientifique. Ce chapitre liste aussi les scénarios retenus pour couvrir ces incertitudes.

Les éléments complémentaires (études détaillées, recherches et expérimentations, essais) pour établir le futur dossier d'autorisation de création sont identifiés au fur et à mesure des chapitres.

1.2 Un Dossier 2005, des acquis, des évolutions de conception pour réduire les risques et répondre aux demandes des évaluateurs et du débat public

1.2.1 Les acquis du Dossier 2005

Au stade du Dossier 2005, le but de la faisabilité était de montrer l'existence de solutions techniques pour la création d'un stockage réversible et sûr, non de les figer définitivement ; les solutions proposées à ce stade ne prétendaient pas être optimisées, en particulier au plan de la sûreté d'exploitation et de la radioprotection. Le positionnement du stockage était arbitrairement fixé au sein de la zone de 250 km^2 reconnue autour du laboratoire souterrain comme présentant des propriétés similaires, en s'assurant de la transposabilité des résultats de l'analyse de sûreté sur cette zone. Le Dossier 2005 a distingué deux phases de vie du stockage et conduit deux analyses de sûreté complémentaires : l'une relative à l'exploitation, qui s'apparente à une démarche classique d'évaluation de sûreté d'une installation nucléaire de base, l'autre relative à l'évolution après fermeture.

La sûreté après fermeture a déjà été abordée de manière détaillée dans le Dossier 2005. Elle était intégrée dans le choix des options techniques d'architecture. Les performances du stockage et de ses composants ont été évaluées, en évolution normale et pour quatre scénarios d'évolution altérée : défaut de scellement, défaut de colis, forage et fonctionnement dégradé (Andra, 2005c). Cette évaluation est double, tant de manière qualitative qu'à l'aide de calculs et d'indicateurs comme le débit molaire, la concentration, le régime d'écoulement et le transfert des solutés. Une évaluation de l'impact en terme de dose a aussi été menée montrant notamment que l'impact était acceptable pour tous les scénarios. La sûreté en exploitation a été aussi intégrée dès la conception du stockage et évaluée selon les méthodes usuelles (Andra, 2005b). Le Dossier 2005 s'est attaché à éclairer les risques, d'origines interne ou externe les plus significatifs pour un stockage impliquant les colis de déchets en particulier pour les installations souterraines. Pour cela, des études de scénarios accidentels ont permis d'évaluer le risque de dissémination de la radioactivité : c'est la chute de colis, l'incendie d'un camion transportant des colis et l'explosion due au relâchement de H_2. Ces études ont été parfois complétées par des essais. Tout cela a permis de vérifier au stade de la faisabilité, la capacité à réduire ces risques en exploitation et les incertitudes sur le long terme à un niveau aussi bas que possible en l'état actuel des connaissances techniques et des conditions socio-économiques.

Sur la base de ces analyses, l'Andra a établi, et les évaluateurs ont confirmé, que la protection des personnes et de l'environnement à court et long terme qui constitue l'objectif fondamental assigné au centre de stockage de déchets en formation géologique profonde repose sur :

- la connaissance des déchets et des matériaux avec des interactions limitées,
- un site sans accident géologique, stable et exempt de ressources exceptionnelles,
- une roche hôte, épaisse, homogène, peu perméable, aux propriétés géochimiques favorables, étudiée in situ par un laboratoire souterrain,
- des fonctions de sûreté réparties sur plusieurs familles de composants (roche hôte, ouvrages, colis) permettant entre autres de confiner la radioactivité, de limiter les flux d'eau et de retarder et atténuer les flux de radionucléides dans la roche hôte à long terme,
- une analyse de sûreté qui s'appuie sur une compréhension fine de l'évolution à long terme du stockage et des événements pouvant l'affecter et sur l'intégration des incertitudes,
- une conception réduisant l'impact à un niveau « aussi bas que raisonnablement possible », même en cas de défaillance de composants ou d'événements externes affectant le stockage, avec un flux de radionucléides sortant du Callovo-Oxfordien très limité, retardé et une dose inférieure à 0,25 $mSv.an^{-1}$ pour le groupe potentiellement le plus exposé.

Tous ces éléments rassemblés dans le Dossier 2005 vont dans le sens d'une faisabilité de principe, pour plusieurs raisons :

Une zone de 250 km² en Meuse/Haute-Marne présentant des conditions géologiques favorables

La couche du Callovo-Oxfordien réunit des propriétés très intéressantes, conformes à ce qui est attendu pour la conception d'un stockage en milieu argileux :

- La couche du Callovo-Oxfordien correspond à une formation argileuse stable, âgée de 150 millions d'années, située à une profondeur comprise entre 400 et 600 m ;
- La couche présente une épaisseur importante (>130 m) et n'est pas affectée par des failles sur de grands volumes. Son histoire géologique est bien connue ;
- Elle est très peu sujette aux phénomènes sismiques ;
- La couche contient très peu d'eau et le déplacement de cette dernière y est extrêmement lent, du fait de la très faible perméabilité de la couche ;
- Les caractérisations physiques et chimiques montrent en outre qu'elle possède une forte capacité à retenir et à piéger la majeure partie des éléments chimiques et des radionucléides présents dans les déchets (cf. Figure 1.2-1) ;
- Elle est apte au creusement par des techniques de travaux souterrains et la réalisation d'ouvrages n'y induit que des perturbations modérées qui ne sont, a priori, pas susceptibles de créer des chemins d'écoulement préférentiels. Il existe une zone de 250 km² où ces propriétés sont a priori réunies (zone dite de transposition) ;
- Enfin, la mise en commun des données recueillies a permis de bâtir un modèle d'ensemble de la géologie du secteur, y compris les formations situées au-dessus et en dessous du Callovo-Oxfordien. Intrinsèquement, le milieu géologique présente donc des caractéristiques favorables qui le rendent apte à accueillir un stockage.

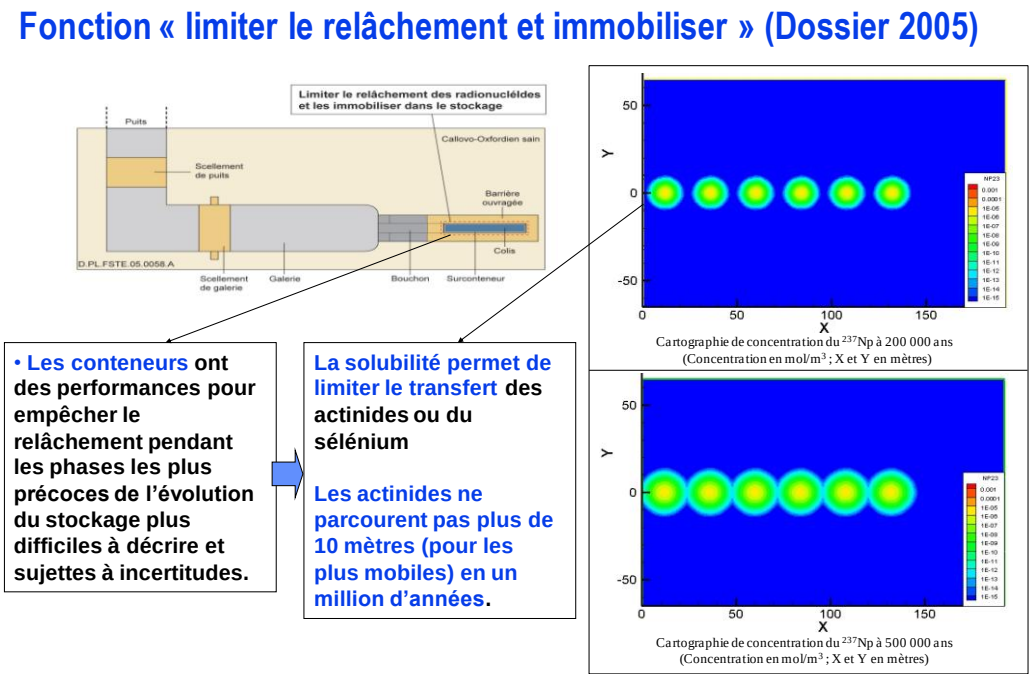


Figure 1.2-1 *Illustration du Dossier 2005 montrant la capacité de la roche hôte à retenir les actinides*

Des options de conception et des architectures élaborées pour tirer parti des conditions géologiques favorables et des pratiques existantes en matière de technologie

Dans le Dossier 2005, l'Andra a retenu des options simples au plan technique et robustes vis-à-vis des limites actuelles des connaissances et de la technologie :

- La simplicité des options étudiées favorise la compréhension du fonctionnement d'un stockage, aux différentes échelles de temps ;
- La séparation des divers types de déchets dans des zones distinctes évite des interactions en particulier thermiques et chimiques qui complexifieraient cette compréhension. L'évaluation des performances d'un stockage, en matière de réversibilité et de sûreté, s'en trouve facilitée.

L'architecture de stockage prend en compte les aspects géométriques de la formation hôte (épaisseur, profondeur…) ainsi que ses caractéristiques mécanique et thermique. Les options de conception mobilisent les propriétés favorables de la formation étudiée en matière de confinement (très faible perméabilité, faibles gradients hydrogéologiques, capacité de rétention et propriétés géochimiques).

Vis-à-vis du comportement mécanique des argilites, des hypothèses de travail prudentes ont été retenues dans le cadre du Dossier 2005, et ont probablement conduit à dimensionner les revêtements des ouvrages souterrains avec des marges.

Au droit des dispositifs de scellement, on a proposé et étudié des moyens pour interrompre, au plan hydraulique, l'auréole d'argilite qui pourrait être fracturée au voisinage des excavations.

La faisabilité de la réalisation des différents composants d'un stockage a été vérifiée en s'appuyant sur des procédés éprouvés dans l'industrie (creusement des cavités souterraines, mise en place de soutènements et de revêtements, etc.). On a aussi montré l'existence, ou la possibilité de concevoir, des moyens pour exploiter les installations, sur la base de technologies aujourd'hui disponibles (réception, préparation et mise en place de colis, maintenance des installations). De manière générale, la faisabilité technologique des options présentées repose sur un retour d'expérience industriel, en privilégiant les analogies avec, notamment, le domaine des travaux souterrains et celui des installations nucléaires. Sur certains aspects spécifiques, cela a été complété par des essais : réalisation de démonstrateurs de conteneurs de stockage, réalisation d'essais relatifs au remblayage et au scellement des ouvrages souterrains.

Les options de conception étudiées ont été confrontées à celles envisagées dans d'autres pays, dans le cadre d'échanges et de coopérations scientifiques et techniques internationales (par exemple projet ESDRED). Il en ressort de nombreux points de convergence. On peut relever à titre d'exemples la conception de colis de stockage, les critères de dimensionnement thermique, ou encore les dispositifs mis en place lors de la fermeture d'un stockage.

D'une manière générale, des différences existent entre les solutions techniques proposées au niveau international, qui s'expliquent le plus souvent par le contexte géologique spécifique de chaque pays (formations argileuses ou non, démarche générique ou relative à un site particulier), par les colis de déchets et les inventaires pris en compte en référence (déchets de retraitement ou combustibles usés, taille du parc électronucléaire).

<u>Des options de conception conçues pour répondre aux fonctions de sûreté attendues d'un stockage à la fois en exploitation et après fermeture</u>

- En exploitation :

L'analyse de risques menée en phase exploitation avait pour objectif de donner des orientations techniques et de proposer des mesures de réduction de risques éprouvées. Cette analyse menée de manière systématique a bénéficié du retour d'expérience d'installations industrielles existantes et d'installations minières. L'analyse de risques a distingué les risques conventionnels, rencontrés classiquement dans toute installation industrielle, les risques liés aux caractéristiques physico-chimiques et radiologiques des déchets, et les risques liés à l'environnement extérieur du stockage. Le Dossier 2005 (Andra, 2005b) est focalisé sur une présentation de l'analyse des risques dans les installations souterraines du fait de la spécificité du centre de stockage de déchets HA-MAVL. Le Dossier 2005 soulève les points suivants :

- ✓ L'évaluation dosimétrique en exploitation des installations a montré que les doses reçues par le personnel et le public seraient inférieures aux contraintes annuelles que s'est fixée l'Andra, soit 5 mSv pour les travailleurs et 0,25 mSv pour le public, avant optimisation de l'exploitation et des postes de travail ;

- ✓ L'analyse de sûreté en exploitation conduite dans le cadre du Dossier 2005 n'a pas mis en évidence d'éléments mettant en cause la faisabilité technique de la construction et de l'exploitation, la fermeture du stockage et sa gestion réversible par étape ;
- ✓ Un bilan de l'analyse (cf. Tableau 1.2-1) est présenté par type d'activité (construction, exploitation, fermeture). La conduite de travaux associés à un retrait éventuel des colis de stockage a également été envisagée dans le cadre du Dossier 2005 ;
- ✓ Les risques radiologiques associés au transfert et à la mise en place des colis en alvéole de stockage demandent des compléments d'étude ;
- ✓ Les risques induits par des incendies d'engin nécessitent de prendre en compte leurs caractéristiques et le fait que l'incendie se développerait dans un milieu semi confiné.

De même, les scénarios de chute de colis font référence à des hauteurs de chute qui diffèrent des hauteurs usuelles de manutention dans les installations de surface, en particulier au cours du transfert de la hotte en puits et méritent une optimisation.

Tableau 1.2-1 Rappel du bilan relatif aux risques radiologiques liés au stockage au stade du Dossier 2005 (Andra, 2005b)

Activités / **Risques**	**Exploitation**			**Fermeture**	**Retrait éventuel des colis**
	Installations de surface	Transfert jour / fond	Installations souterraines		
Défaut de protection radiologique lié à un équipement	X		x	x	x
Défaut de protection radiologique au cours d'une intervention	X		x	x	x
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à un incendie dans une cellule des installations de surface	X				
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à une chute de colis primaire dans les installations de surface	(B1 et CU nus)				
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à un incendie d'un engin de transport ou de manutention	x		x		x
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à une chute de colis B au moment de sa mise en stockage ou de son retrait			x		x
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis / criticité[2] liés à une dérive incontrôlée ou à une chute de cage en puits lors d'un transport de hotte		x			

x Risque à prendre en compte — Risque négligeable — Sans objet — Risque devant faire l'objet d'une étude complémentaire

- Après fermeture :

La faisabilité de principe du stockage est acquise avec un degré de confiance raisonnable. En particulier, l'évaluation de sûreté montre que les objectifs de protection radiologique de l'homme et de l'environnement sont respectés. De plus, la sûreté du stockage repose sur un concept multifonctions, faisant intervenir de manière complémentaire le site, les dispositions de conception (aussi bien l'ajout

[1] Les colis B du Dossier 2005 correspondent au colis dits MAVL dans la suite du document
[2] Le risque de criticité ne concerne que les combustibles usés.

de composants ouvragés que l'organisation générale du stockage, fractionné et disposé en cul-de-sac) et les colis primaires. La formation hôte s'impose comme un composant essentiel du système, dans la mesure où elle contribue à l'ensemble des fonctions qui ont été définies. Cela confère une bonne robustesse au stockage, à court comme à très long terme. Les situations d'évolution altérée qui ressortent de l'analyse relèvent d'un nombre limité de scénarios bien identifiés. Ceux-ci confirment la robustesse du concept de stockage, et n'induisent pas de flux sortant de radionucléide ou d'impact radiologique significativement supérieurs à ceux du scénario d'évolution normale. Pour mémoire, l'impact maximal potentiel, même en scénarios altérés, est très inférieur à la valeur de référence de 0,25 mSv/an, qui correspond elle-même à une fraction (environ 10%) de l'impact de la radioactivité naturelle :

- ✓ la contribution des déchets MAVL apparaît faible (< 0,0005 $mSv.an^{-1}$),
- ✓ la contribution des déchets HA (C) se situe plusieurs ordres de grandeur en dessous des limites de référence retenues (0,0008 $mSv.an^{-1}$),
- ✓ dans le cas où le stockage de combustibles CEA (CU3[3]) serait envisagé, leur impact serait négligeable (inférieur à 0,0001 $mSv.an^{-1}$),
- ✓ l'évaluation est peu sensible à l'évolution hydrogéologique à un million d'années.

La formation hôte s'impose comme un composant essentiel du système, dans la mesure où elle contribue à l'ensemble des fonctions qui ont été définies :

- ✓ du fait de sa perméabilité réduite. Celle-ci conditionne non seulement la prédominance du régime diffusif en situation normale mais elle s'avère un paramètre essentiel en cas de situation altérée, telle qu'un défaut de scellements ou un forage. Elle permet en effet de limiter les apports en eau vers toute voie de circulation court-circuitant la roche, qu'il s'agisse des voies d'accès au stockage ou d'une voie créée par une intrusion humaine, ou d'une hétérogénéité non détectée,
- ✓ du fait de caractéristiques physico-chimiques favorables. La roche contribue à imposer un pH proche de la neutralité et des conditions réductrices qui sont propices à la maîtrise des relâchements, notamment pour les déchets vitrifiés. La solubilité de nombreux éléments y est réduite. Sa faible porosité contribue également à limiter les risques de transport colloïdal,
  par de faibles vitesses de diffusion, ainsi que les capacités de sorption élevées des argilites. En effet, dans la mesure où les ouvrages d'accès au stockage ne constituent pas une voie de circulation privilégiée pour les radionucléides, la roche hôte contrôle la très grande majorité des flux. Elle permet de ralentir et d'atténuer totalement l'ensemble de l'inventaire en radionucléides, à la seule exception de quatre radionucléides en situation d'évolution normale (^{129}I, ^{36}Cl, ^{79}Se et marginalement du ^{41}Ca. Leur transfert vers la biosphère est fortement retardé et étalé dans le temps et l'espace).

[3] Les CU3 correspondent à des combustibles du CEA civils et militaires.

Impact radiologique

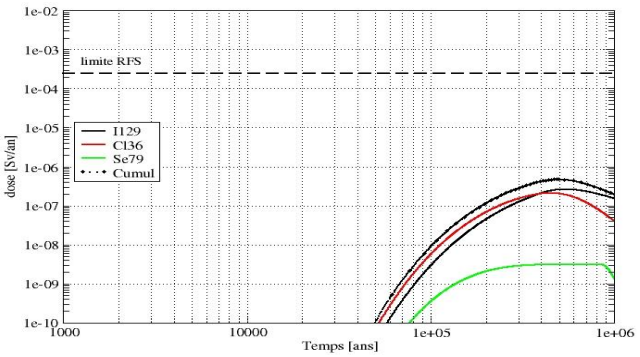
Scénario d'évolution normale (SEN) (Dossier 2005)

⇨Le Callovo-Oxfordien présente une très bonne capacité à retarder et étaler la migration des radionucléides

⇨ Sur la totalité des radionucléides (144), seuls 3 présentent une masse non totalement atténuée en sortie de Callovo-Oxfordien

⇨Les maxima de débits d'activité de ces radionucléides se situent au-delà de 100 000 ans

⇨ L'impact radiologique reste toujours inférieur à 0,25 mSv/an (valeur fixée dans la RFS III.2.f)



SEN – Calcul de référence – Modèle à 1 million d'années – Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis HA (type C1, C2)

Figure 1.2-2 *Illustration (cas du scénario d'évolution normale du Dossier Argile 2005) montrant la capacité du stockage et du Callovo-Oxfordien à retenir la majorité des radionucléides*

Les scellements reconstituent efficacement la continuité hydraulique du milieu, les ouvrages d'accès ne constituant pas des voies de transfert privilégiées.

Dans des situations hypothétiques d'intrusion humaine, le fractionnement du stockage par des scellements contribue à empêcher que l'influence hydraulique du forage ne se propage.

Le défaut de scellements n'apparaît pas comme un événement très dommageable pour la sûreté du stockage. Les dispositions prises dans la conception du stockage et notamment les longueurs de galeries à parcourir, la disposition en cul-de-sac et les caractéristiques favorables de la roche hôte tels les faibles gradients, la faible quantité d'eau apportée par le milieu géologique, et le rôle de « barrière absorbante » rempli par la roche le long du trajet des radionucléides dans les ouvrages, contribuent tous ensemble à limiter l'impact d'une telle situation.

Les conteneurs de stockage des colis de déchets vitrifiés et de combustibles usés ont une épaisseur d'acier définie avec une marge suffisante pour gérer les incertitudes sur le comportement du verre et des radionucléides à une température supérieure à 50°C.

Les matrices de déchets présentent pour la plupart des capacités de confinement, dont certaines sont exploitées par les calculs de performances (cas de la matrice de verre et des bitumes) et d'autres ont été négligées par prudence (majorité des colis MAVL). L'Andra a retenu, soit en référence, soit en études de sensibilité, des modèles conservatifs offrant souvent des marges de sûreté importantes par rapport à ceux qui sont issus de l'état le plus récent de la recherche.

1.2.2 Les évolutions depuis le Dossier Argile 2005

En vue de la demande d'autorisation de création (DAC) du futur centre de stockage en 2014, l'Andra a engagé dès 2006, une revue des options de conception (nature des composants mis en place, organisation des alvéoles dans l'architecture et modes d'exploitation), visant à :

- Tenir compte notamment des recommandations des experts nationaux et internationaux ayant instruit le Dossier 2005. En effet, certaines dispositions (ou principes de conception) du Dossier 2005 ont suscité des questionnements de leur part et ont amené l'Andra à réévaluer entre 2006 et 2009 notamment :
  - ✓ l'incidence de la mise en place d'une architecture en cul-de-sac et en particulier d'alvéoles MAVL borgnes vis-à-vis de la complexité et de la robustesse de la ventilation (du stockage en général et des alvéoles MAVL en particulier); les experts ont entre autres recommandé

d'étudier des options alternatives tout en vérifiant que l'architecture résultante ne dégradait pas la sûreté à long terme,
- ✓ le réseau des galeries et son niveau éventuel de complexité, en lien avec la séparation des activités travaux et exploitation,
- ✓ la maîtrise des gaz de corrosion produits par les alvéoles HA (en particulier les surconteneurs et le chemisage),
- ✓ la robustesse de la ventilation pendant toute la durée de l'exploitation et lors des opérations de fermeture d'alvéoles MAVL,
- ✓ les dispositions techniques permettant d'améliorer la sûreté en exploitation (moyens de transfert permettant de réduire les hauteurs de chute de colis...) tout en s'assurant que la sûreté après fermeture reste maintenue notamment en vérifiant que l'objectif fondamental de protection pour une nouvelle architecture résultante dite à terminaison et autre que celle du Dossier 2005 reste acceptable,
- ✓ les conditions de reprise des colis et les options en termes d'observation et de surveillance du stockage et de son environnement associées.

- Optimiser les options de conception conformément au guide de sûreté qui stipule que « des objectifs quantitatifs pour les performances des différents composants du système de stockage ne seront valablement fixés qu'à l'issue d'un processus itératif, intégrant l'expérience acquise au cours de l'étude de la sûreté du stockage. ». L'optimisation passe entre autres par la prise en compte du retour d'expérience du laboratoire souterrain acquis depuis le Dossier 2005 (Andra, 2009g), par le retour d'expérience des essais technologiques réalisés depuis 2005, et par une prise en compte des progrès scientifiques et technologiques.
  Les principales évolutions des options de conception depuis le Dossier 2005 qui ont permis d'arriver aux solutions techniques et présentées en détail dans le document (Andra, 2009c) ont cherché à :
  - ✓ Améliorer la sécurité du travail et la sûreté d'exploitation (nucléaire) (cf. chapitre 3) :
    - par la réduction du risque de chute des colis MAVL. Des évolutions sur le mode de transfert des colis de stockage en alvéole MAVL ont été réalisées pour réduire la hauteur de chute des colis et adapter le moyen de manutention à la typologie des colis : chariot à fourche ou de pont gerbeur minimisant ainsi les hauteurs de chute,
    - par la maîtrise de la ventilation nucléaire pendant toute la durée d'exploitation de l'installation,
    - par la réduction du risque incendie.
  - ✓ Améliorer les alvéoles de colis de stockage HA :
    - par la réduction de la production de gaz en particulier après fermeture (cf. chapitre 4) ; les pistes explorées croisent différentes approches : meilleure connaissance des phénomènes (permettant de réduire les incertitudes et les marges prises pour les couvrir), réduction du terme source par réduction des masses et /ou des surfaces soumises à la corrosion, recours à des matériaux non ou moins corrodables, géométries d'alvéoles favorisant la dissipation (une longueur accrue y contribue),
    - vis-à-vis de leur fermeture et de la réversibilité (dépose ou maintien du chemisage en tête d'alvéole).
  - ✓ Simplifier dans la mesure du possible et au stade actuel de la connaissance les solutions proposées (facteurs de robustesse vis-à-vis des risques, d'amélioration de gestion de l'exploitation, de réduction de coût, bénéfique à la sécurité, à la sûreté) :
    - par une standardisation des colis de stockage,
    - par la mise en place d'alvéoles MAVL « passantes » avec un positionnement en aval des gaines et galeries dédiées à la ventilation,
    - par une proposition d'agencement des alvéoles permettant de gérer à la fois les contraintes d'exploitations (co-stockage de colis différents) et les exigences en matières de sûreté (ne pas mélanger de colis organiques avec d'autres lors du co-stockage),
    - par l'allongement des alvéoles (réduction du linéaire de galeries d'accès) en vérifiant que cet allongement n'impacte pas la fonction à long terme « s'opposer à la circulation d'eau »,

- par la réduction du nombre de galeries, par redistribution des fonctions (co-activité à instruire) ou via l'architecture des installations souterraines),
- par la définition d'un concept de scellement sans saignées de coupure hydraulique.

- Permettre une flexibilité d'implantation par la mise en place d'une galerie déroulée d'environ 10% de pente. L'entrée de cet ouvrage pourrait se situer jusqu'à environ 5 km par rapport à la zone des puits avec deux modes de transfert actuellement envisagés : le transfert des colis de stockage par des camions ou un funiculaire. Le transfert de colis par descenderie déroulée devient la référence par rapport au Dossier 2005 mais le transfert par puits n'est pas écarté à ce stade.

Ces dispositions pouvant conduire à revoir l'architecture globale (« architecture à terminaison ») du stockage et les niveaux de borgnitude à différentes échelles d'espace (alvéole, zone, stockage), une vérification que la sûreté après fermeture reste maîtrisée, a été réalisée pour chaque nouvelle architecture envisagée conformément au Guide de sûreté: « *L'opportunité de retenir ces dispositions [favorables du point de vue de la sûreté après la fermeture] pour la conception du système de stockage devra néanmoins être confirmée sur la base de l'analyse de leur compatibilité avec une exploitation sûre de l'installation et avec le respect des conditions de réversibilité.* ». Le chapitre 4 présente ainsi l'architecture à terminaison actuellement envisagée et en quoi celle-ci respecte toujours les objectifs de sûreté à long terme et ne modifie pas les conclusions du dossier 2005 en termes de scénarios à quantifier et d'impacts.

Les recommandations des évaluateurs du Dossier Argile 2005 et l'identification de pistes d'optimisation ont donc amené l'Andra à ré-analyser les options de conception au regard à la fois des aspects de sûreté en exploitation (meilleure maîtrise des risques de dissémination radioactive, d'exposition externe en situation accidentelle…) et après fermeture (maîtrise des incertitudes sur le comportement des radionucléides pendant la phase thermique, gestion des gaz...).

Les analyses de sûreté décrites dans les chapitres 2 à 4 et les options de sûreté qui en résultent sont associées aux options de conception au stade de 2009.

1.3 Une démarche itérative du développement d'un stockage

1.3.1 La démarche itérative de conception

La démarche itérative de conception du stockage s'appuie sur le lien étroit entre la conception, les acquisitions de connaissance et les évaluations de sûreté et de réversibilité.

Cette démarche utilisée dès les phases amonts de la conception, a permis de tirer les enseignements de l'analyse de sûreté et de l'analyse des modalités de réversibilité pour orienter progressivement les choix vers des solutions offrant le plus de robustesse vis-à-vis des incertitudes de connaissances et d'introduire des mesures de prévention et de protection en regard des risques identifiés. Elle a également permis de prendre en compte le retour d'expérience acquis lors de la phase précédente pour identifier des pistes d'optimisation de la conception à étudier dans la phase suivante d'étude.

Chaque itération d'étude se caractérise par des acquisitions de connaissances et par l'étude de solutions techniques en cohérence avec ces connaissances. Ces dernières permettent d'appréhender le comportement des concepts étudiés au moyen de modélisations. Ces éléments constituent la base de l'analyse de la sûreté axée sur les fonctions à long terme du stockage et sur sa sûreté en exploitation, de l'analyse des modalités de réversibilité et de l'optimisation technique du stockage. Les enseignements de l'analyse deviennent alors une donnée d'entrée de l'itération suivante.

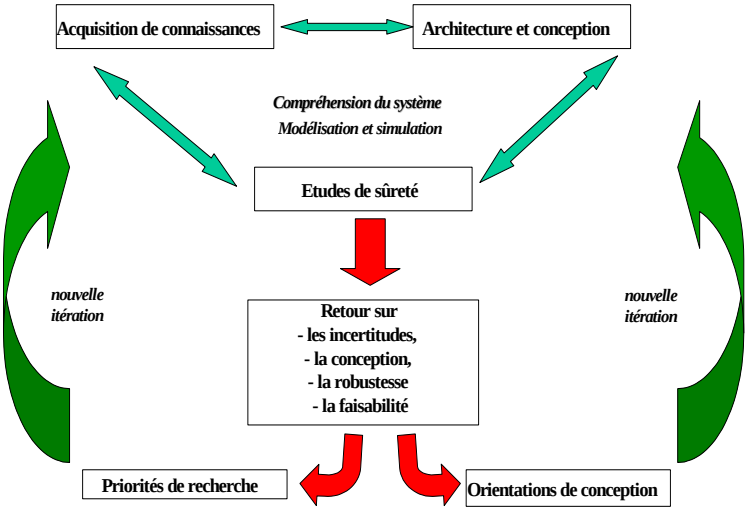


Figure 1.3-1 La démarche itérative de conception du stockage

1.3.2 Les étapes de conception et de développement du stockage

Suite au dossier 2005 présentant la faisabilité de principe de conception du stockage, la loi de programme du 28 Juin 2006 prévoit un processus de décision progressif, qui conduira l'Andra à présenter une Demande d'Autorisation de Création (DAC) du stockage géologique en 2014, afin de le mettre en service en 2025 et de l'exploiter de manière réversible pendant au moins 100 ans. Pendant son exploitation, ce stockage sera soumis à un réexamen de sûreté, a minima décennal, sous contrôle de l'ASN. Ces jalons décisionnels impliqueront de nouvelles itérations science-ingénierie-sûreté, pour aboutir à un stockage capable d'intégrer les progrès scientifiques et technologiques sur un cycle de vie de près d'un siècle et demi, pendant lequel l'Andra poursuivra l'optimisation suivant la logique ALARA[4].

En 2009, les options de sûreté du présent document identifient les exigences en termes de dispositions techniques et organisationnelles à retenir dans les futures études d'ingénierie détaillées pour assurer les fonctions de sûreté et maîtriser les risques de différentes origines (internes, externes, incertitudes scientifiques). Ces exigences permettront de poursuivre le dimensionnement de l'installation et de préciser les opérations d'exploitation (manutention, surveillance, maintenance...) en vue de la demande d'autorisation de création. Les options retenues pourront être différenciées en fonction des colis (contenu radiologique, dissémination de ce contenu en cas d'accident, masse et volume, génération de gaz).

La phase suivante d'études (2010-2012) vise notamment à préparer le dossier support à l'organisation du débat public. Elle comprend la réalisation depuis la surface des opérations de reconnaissance approfondie sur la zone d'intérêt en souterrain pour l'implantation du stockage et l'étude des scénarios d'aménagement en surface compatibles avec cette zone d'intérêt. Des études, essais et démonstrateurs menés, notamment au Laboratoire souterrain du Centre Meuse/Haute-Marne, apporteront les éléments de démonstration complémentaires à la faisabilité des options de conception, d'observation et surveillance et de réversibilité, aux choix des procédés de réalisation et aux dimensionnements des ouvrages dans le milieu souterrain. Ces études sont complétées par la réalisation de démonstrateurs technologiques (de colis de stockage et de manutention) en surface. Les études d'ingénierie fourniront les éléments de la démonstration de sûreté de l'installation en vue d'une Demande d'Autorisation de Création (DAC).

Les résultats de ces études seront présentés par l'Andra dans le dossier support à l'organisation du débat public prévu par la loi du 28 juin 2006. Ce dossier remis d'ici fin 2012 comprendra notamment une proposition pour un site d'implantation du stockage géologique.

[4] A low as reasonnably achievable : aussi bas que raisonnablement possible, en référence aux publications de la CIPR.

Le dossier de demande d'autorisation de création du stockage comprendra les éléments du dossier conformément au Décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives, notamment un rapport préliminaire de sûreté, et une étude d'impact sur la base de la description des installations et de l'état du site et de son environnement avant l'implantation de l'installation.

Sous réserve de l'obtention de l'autorisation de création, les premiers travaux à réaliser concerneraient l'aménagement du site en surface et la réalisation des ouvrages de liaison entre la surface et le fond, suivis par la réalisation des installations de surface du centre de stockage, des installations techniques souterraines et des premières alvéoles de stockage. La construction des ouvrages nécessitera la réalisation d'études de niveau « projet » puis « exécution ».

Par ailleurs, pour réduire les risques associés aux aléas de chantier et préserver une période d'essais inactifs de l'installation au terme de la construction et avant la mise en service, on privilégiera des options d'architecture et d'organisation des travaux permettant un fonctionnement en parallèle autant que possible.

La mise en service du centre de stockage au plus tard à fin 2025, sous réserve d'une décision d'autoriser l'Andra à cette mise en service, enclenchera l'accueil de premiers colis de déchets, la préparation des colis de stockage et le transfert de ces derniers dans les premières alvéoles réalisées en souterrain. Elle permettra de réaliser une démonstration en vraie grandeur « en actif », avec de véritables colis de déchets. Les essais en inactif, puis en actif qui accompagneront la mise en service, permettront de vérifier en conditions représentatives de l'exploitation toutes les fonctionnalités de l'installation, dont notamment la possibilité de retirer des colis stockés, dans le cadre de la réversibilité.

Tout au long de la construction et de l'exploitation de l'installation, les options de conception et leur déclinaison technique ou organisationnelle pourront évoluer pour intégrer le retour d'expérience notamment de la construction, de l'exploitation des premières alvéoles, des résultats de l'observation surveillance, les enseignements de la poursuite éventuelle de certaines expérimentations en laboratoire souterrain et les avancées de la connaissance scientifique et technique. Vis-à-vis de la sûreté, il s'agira alors de vérifier la compatibilité de chaque évolution avec les exigences de sûreté en exploitation et après fermeture.

La loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 et plus particulièrement le décret n° 2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux installations nucléaires de base [INB] et au contrôle en matière de sûreté nucléaire du transport de substances radioactives précisent les dossiers à fournir pour la demande d'autorisation de création et de mise en service d'une installation nucléaire de base. La gestion de la sûreté de l'installation suivra un processus par étapes avec des réexamens de sûreté réguliers intégrant le retour d'expérience de l'exploitation de l'installation. Chaque réexamen pourra conduire à modifier les options de conception pour la construction et l'exploitation des parties nouvelles de l'installation.

1.3.3 2009 : une nouvelle itération entre conception/science et sûreté et une première étape vers le choix de site

Comme indiqué dans la section 1.2, les différentes évaluations du Dossier 2005, les avancées obtenues grâce aux études d'ingénierie, scientifiques et aux expérimentations ont amené à des options de conception au stade de 2009 qui sont présentées dans le document (Andra, 2009c). Les options de sûreté du présent document intègrent ces éléments de conceptions.

La définition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface s'appuie notamment sur :

- les résultats des investigations géologiques, et en particulier celles menées en 2007-2008, qui ont permis d'acquérir une connaissance géologique homogène à l'échelle de la zone de transposition, et l'analyse des critères liés à la géologie et à la sûreté à prendre en compte pour implanter les installations souterraines,
- l'analyse des contraintes environnementales et des contraintes liées à la sûreté à prendre en compte pour implanter les installations de surface ainsi que l'étude de solutions techniques offrant de la flexibilité pour implanter les installations de surface,

- les échanges avec les acteurs locaux qui ont permis d'identifier des critères d'aménagement du territoire et d'insertion locale à prendre en compte pour implanter le projet de centre de stockage.

Les options de sûreté présentées dans ce document sont en cohérence avec l'état d'avancement actuel relatif à l'implantation possible des installations présentée dans le document intitulé « Stockage réversible profond-Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface » (Andra, 2009 f).

1.3.4 Une conception de stockage modulaire permettant un développement par étapes en raison de la durée d'exploitation prévue pour le stockage et de la demande de réversibilité

Sous réserve d'autorisation de création, les premiers travaux à réaliser concerneraient l'aménagement du site et la réalisation des ouvrages de liaison entre la surface et le fond, suivis par la réalisation des installations de surface du centre de stockage, des installations techniques souterraines et des premières alvéoles de stockage. La construction des ouvrages nécessite l'approfondissement des études d'avant-projet et la réalisation d'études de niveau « projet » puis « exécution ».

La première mise en œuvre de substances radioactives dans l'installation sera soumise à autorisation ; le dossier de demande d'autorisation de mise en service comprendra notamment, le rapport de sûreté comportant la mise à jour du rapport préliminaire de sûreté, les éléments permettant d'apprécier la conformité de l'installation réalisée, les règles générales d'exploitation de l'installation ainsi qu'un plan d'urgence interne.

En support au développement du centre de stockage, le programme expérimental mis en œuvre dans le Laboratoire souterrain (Andra, 2009g), le centre technologique et les différents essais en surface constituent un moyen privilégié pour tester la réalisation de procédés, des ouvrages dans le milieu souterrain, étudier les perturbations engendrées sur la roche ou la robustesse de certains équipements à des situations dangereuses, mettre au point des méthodes d'observation-surveillance. Les données acquises contribueront ainsi à la démonstration de la faisabilité des options de conception et à la préparation de la phase industrielle du centre de stockage, aux évaluations de sûreté et de réversibilité, aux optimisations futures de la conception.

Par ailleurs, le principe de mettre en place une architecture souterraine modulaire qui répond à des exigences de sûreté, est un facteur favorable pour la capacité d'évolution de la conception. Elle permet un cadencement des travaux de conception, de réalisation et d'exploitation des alvéoles, le retour d'expérience de la construction et de l'exploitation des premières alvéoles (étant utilisé pour la conception des alvéoles suivantes).

Ainsi, il est proposé en première approche de développer le stockage par tranches successives, qui correspondraient à une dizaine d'années d'exploitation. L'exploitation du stockage s'étendant sur une centaine d'années, voire plus, cette approche permet d'assurer une capacité significative d'évolution de la conception entre la première et la dernière tranche, avec une stabilité à l'échelle de la dizaine d'années. Elle est cohérente avec les exigences de la loi du 13 juin 2006 (loi TSN), qui dispose (article 29) que *« l'exploitant d'une installation nucléaire de base procède périodiquement au réexamen de la sûreté de son installation en prenant en compte les meilleures pratiques internationales »,* et indique : *« les réexamens de sûreté ont lieu tous les dix ans. Toutefois, le décret d'autorisation peut fixer une périodicité différente si les particularités de l'installation le justifient ».*

La Figure 1.3-2 ci-après illustre le développement progressif du stockage dans la zone MAVL. Il est à noter que les différentes tranches y sont schématisées conformément à la conception de référence actuelle, et apparaissent donc très similaires.

Dans la pratique, la conception des tranches évoluera au fur et à mesure. On peut ainsi imaginer que certains concepts, dont le développement n'est pour l'instant pas assez avancé pour être envisagé pour la première tranche, permettent de dégager des optimisations et deviennent la référence pour des tranches ultérieures. Ce pourrait être le cas, par exemple, de chemisages d'alvéole à base de granite, ou de surconteneurs en céramique, qui ne sont considérés que comme des pistes de développements futurs au stade actuel des études.

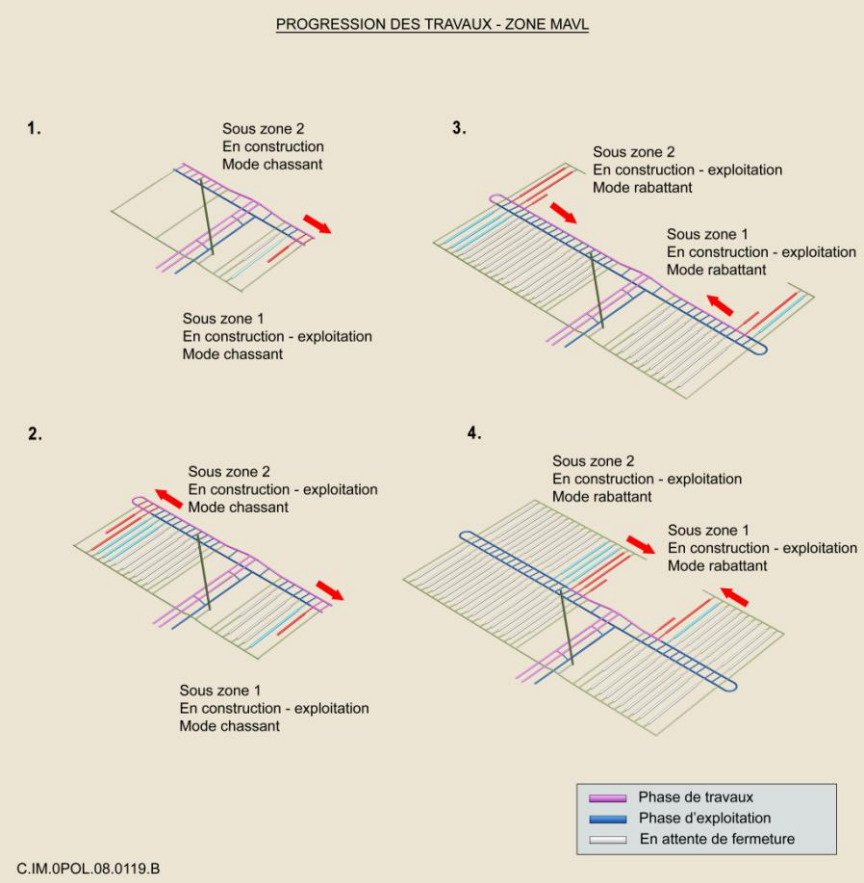


Figure 1.3-2 Exemple de développement progressif de la zone MAVL

1.4 Principes généraux guidant la sûreté

Les principaux objectifs qui doivent orienter la conception sont fournis par le guide de sûreté relatif au stockage en formation géologique profonde (ASN 2008) : *« La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques. Après la fermeture de l'installation de stockage, 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.* »

Avant fermeture, le stockage géologique est conçu de manière à pouvoir garantir et démontrer la sûreté en exploitation et à long terme tant pour l'homme que pour l'environnement, tout en étant réversible et observable sur une durée d'au moins 100 ans.

Contrairement aux autres installations nucléaires dont les durées de vie sont limitées et qui peuvent faire l'objet de surveillance et d'opérations de maintenance, les installations souterraines du stockage, une fois fermées, devront satisfaire aux objectifs de sûreté qui leur sont fixés sans possibilité de recours à des interventions, même s'il est souhaitable que la surveillance du site soit assurée aussi longtemps que possible. La sûreté de l'installation repose donc sur un ensemble de composants assurant des fonctions complémentaires, afin de confiner la radioactivité, de s'opposer aux circulations d'eau dans le stockage et d'isoler les déchets des possibles agressions externes, qu'elles soient d'origine humaine ou liées à des phénomènes naturels : les composants manufacturés du stockage (colis de déchets, éventuels surconteneurs, scellements) et la roche hôte. Sur la longue durée, certains composants manufacturés peuvent finir par perdre leurs propriétés confinantes et c'est la roche hôte et son environnement géologique qui assurent un rôle central vis-à-vis de la sûreté passive. La roche retient et/ou ralentit considérablement les radionucléides (cf. chapitre 4) et permet de préserver

l'installation des différentes agressions externes susceptibles de se produire. Le choix du Callovo-Oxfordien a été fait en accord avec ce principe et pour ses caractéristiques (profondeur, stabilité géologique, faibles circulations des eaux…) qui sont particulièrement favorables à la sûreté.

La protection des personnes et de l'environnement se comprend avant tout comme une protection contre le risque spécifique dû aux déchets radioactifs, à savoir la radioactivité et ses effets induits. Le risque chimique de certains déchets n'est pas pour autant négligeable, mais ne constitue pas un aspect spécifique des déchets considérés. En pratique, d'autres atteintes à l'environnement que le marquage ou la contamination par des substances toxiques, radioactives ou chimiques, sont a priori envisageables. En particulier, la dégradation de ressources naturelles, autrement que par contamination (accès interdit à un gisement de minerai sous-jacent au stockage, échauffement d'une nappe phréatique) pourrait poser un problème. Le choix du site Meuse/Haute-Marne y répond, ne recelant pas de ressource naturelle exceptionnelle. Ces choix sont conformes à la demande du guide de sûreté de ne pas retenir de site recelant une telle ressource exceptionnelle.

Le dimensionnement des composants du stockage comprend des marges pour tenir compte d'un premier jeu d'incertitudes non réductibles, compte tenu du caractère unique du stockage et des échelles de temps particulièrement longues associées à son exploitation, sa surveillance et sa post-surveillance. « Ces marges de dimensionnement » sont distinctes des « marges de sûreté ». Avant d'envisager l'existence d'une marge de sûreté, puis de l'identifier et de la quantifier le cas échéant, il convient de rappeler les principes guidant la conception et l'analyse de sûreté du stockage géologique. Ces principes découlent du code de l'environnement et guide de sûreté ASN2008. Ils sont valables tant en exploitation qu'à long terme, mais se déclinent différemment sur les deux phases de vie du stockage de durée très différentes (de l'ordre de 100 ans pour l'exploitation et supérieure à 10000 ans pour le long terme).

Défense en profondeur : Le stockage est constitué des éléments ouvragés (colis de déchets, composants du stockage) et de la barrière géologique. Chacun de ces éléments assure, isolément ou de manière complémentaire, des fonctions de sûreté multiples. Les formations encaissantes peuvent contribuer, de manière complémentaire, à la fonction « limiter et retarder le relâchement et le transfert des radionucléides (RN) ».

ALARA : L'impact sur l'homme et l'environnement doit être réduit à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment en tenant compte des facteurs économiques (par exemple : coûts/bénéfices). Ce principe n'est pas indépendant, sur des durées séculaires, du principe de réversibilité et d'évolutivité.

Robustesse : Elle est tant intrinsèque que de conception, permettant de se protéger contre les phénomènes connus (aléatoires), les sources d'incertitudes ou les conséquences d'événements indéterminés. Elle suppose une sensibilité aux écarts et incertitudes aussi faible que possible.

Démontrabilité : La faisabilité, la sûreté et la réversibilité doivent pouvoir être démontrées, sans faire appel à des démonstrations compliquées, sujettes à caution. De manière pratique, la démontrabilité est renforcée par la possibilité de faire reposer la démonstration sur des arguments multiples, non nécessairement quantitatifs. Autant que possible, la démonstration comporte des éléments facilement appréhendables par le public, comme des démonstrateurs technologiques, des expérimentations scientifiques ou la comparaison à des analogues.

Réversibilité et évolutivité : Le stockage est conçu de manière à pouvoir intégrer le retour d'expérience de son exploitation et les éventuels progrès technologiques. Il est réversible, selon plusieurs phases successives, de manière à pouvoir ressortir des colis en utilisant les mêmes technologies que celles qui ont servi à leur mise en place.

L'impact sur l'homme et l'environnement est évalué, tant en fonctionnement/évolution normale qu'en scénarios d'évolution altérée, et comparé à des valeurs de référence. A contrario, le stockage ne saurait être dimensionné à l'envers à partir de la valeur de référence prise comme dose « maximale admissible ». Ceci est vrai tant à court qu'à long terme, en raison du principe ALARA précité. La notion de « marge de sûreté » peut être donc associée à d'éventuels « surdimensionnements » motivés par des considérations autres que la sûreté (facilité d'exploitation, entreposage, logistique,

standardisation, utilisation de techniques existantes au lieu de développer une technologie ad hoc, réversibilité…) qui peuvent, le cas échéant, être réduits sans nuire aux principes de sûreté précités.

Ces marges éventuelles sont distinctes des dispositions de conception rendues nécessaires soit pour le respect d'un des principes ci-dessus, soit pour tenir compte d'incertitudes ou se prémunir d'aléas prévisibles (ces dernières relevant de marges de dimensionnement.

Il convient de considérer de manière particulière les dispositions prises pour s'affranchir d'incertitudes de connaissance à un stade donné, et qui sont potentiellement réductibles via des progrès de la connaissance (inventaire d'un déchet, connaissances scientifiques, évolution de matériaux, taux de défauts…). Dans ce cas, une éventuelle optimisation des dispositions de conception est envisageable à condition d'une réduction d'incertitude garantie par des travaux et essais complémentaires.

Au-delà de 10 000 ans, l'évaluation doit être poursuivie en gérant les incertitudes croissantes inhérentes à ces durées.

Une autre exigence est exprimée par le guide en ces termes : la sûreté à long terme du stockage ne doit pas « *dépendre d'un contrôle institutionnel sur lequel on ne peut pas se reposer de façon certaine au-delà d'une période limitée* ». Au-delà d'une phase de surveillance du site, celui-ci doit pouvoir évoluer en restant sûr, sans qu'une intervention humaine soit nécessaire et sans que l'on soit contraint de maintenir la mémoire du stockage et une surveillance. Des moyens seront néanmoins mis en place pour maintenir la mémoire et la surveillance le plus longtemps possible tant que cela apparaît possible notamment en se fondant sur le retour d'expérience des centres de surface.

La protection et donc la sûreté de l'installation de stockage reposent sur :

- la mise en place de technologies permettant de mener à bien l'ensemble des phases de vie du stockage ; ces technologies permettent de réaliser, puis de maintenir ouvert ou de fermer et laisser évoluer le stockage dans des conditions sûres,
- la mise en œuvre de ces technologies éprouvées en utilisant le plus possible le retour d'expérience des autres exploitations nucléaires et minières et des démonstrateurs au CMHM notamment,
- des opérations de construction et d'exploitation qui doivent inclure les exigences de sûreté après fermeture de manière à notamment protéger la roche hôte afin qu'elle assure ses fonctions après fermeture,
- une séparation physique des activités d'exploitation nucléaire des activités de construction pour éviter toute interférence opérationnelle (cf. Figure 1.4-1). A titre d'exemple de séparation spatiale, on peut citer deux descenderies de transfert des colis et de service séparées, une ventilation de la zone travaux séparée de la ventilation de la zone nucléaire, des galeries de travaux séparées des galeries d'exploitation …

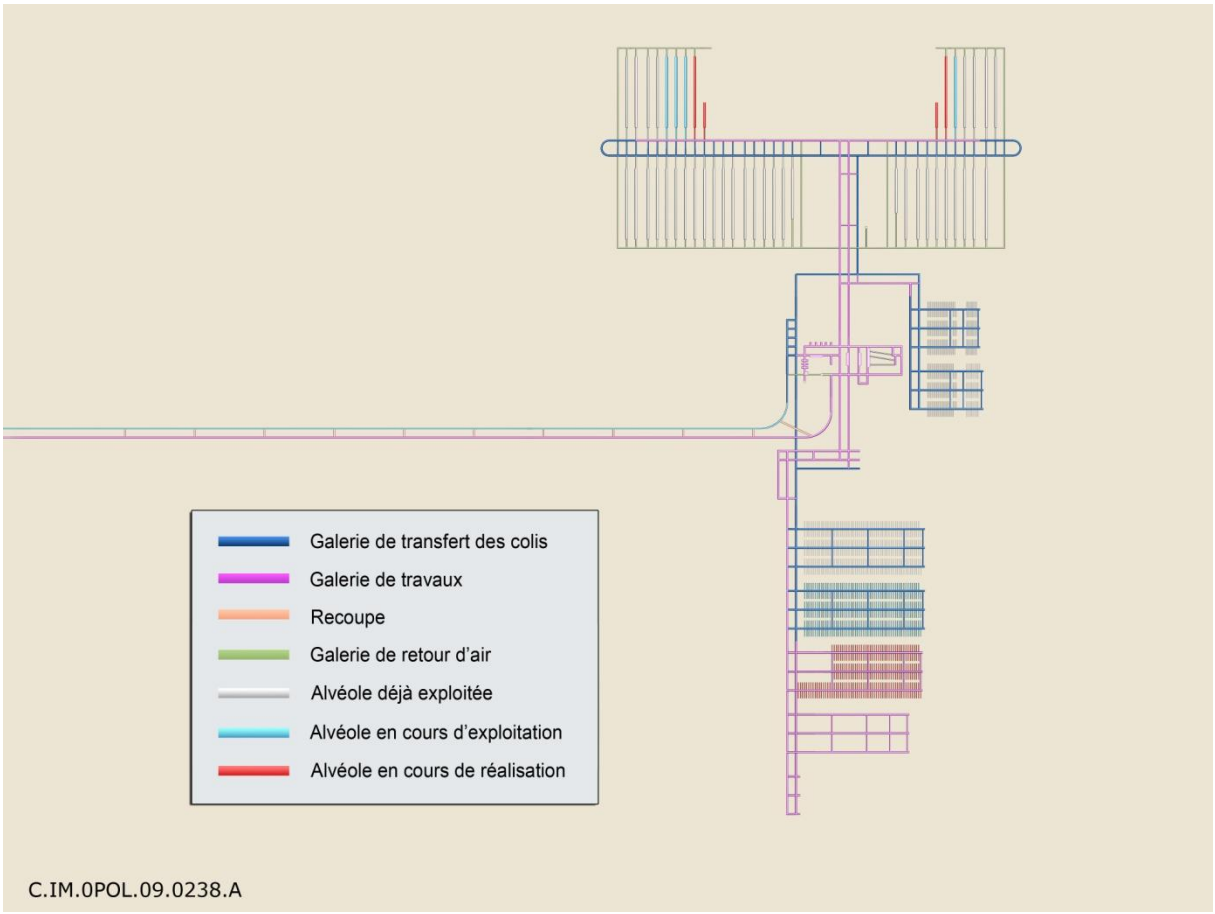


Figure 1.4-1 Illustration de gestion de la co-activité

- une évaluation de la sûreté des concepts de stockage, à la fois à court et à long terme, tout au long du développement du stockage, son exploitation par des réexamens de sûreté réguliers,
- un maintien de la mémoire du stockage le plus longtemps possible et une perte de mémoire traduite par des scénarios d'intrusion humaine qui, compte tenu de la profondeur, se limitent à des forages profond de reconnaissance ou d'exploitation d'eau.

Ces principes guident les choix des options de sûreté, tant pour la conception des installations que pour leurs modalités d'exploitation, en intégrant la connaissance de l'évolution du stockage après fermeture.

1.5 La démarche de sûreté

1.5.1 Description de la démarche

La démarche de sûreté constitue le schéma directeur pour mettre en œuvre les principes de sûreté cités au paragraphe 1.4 en considérant les spécificités de stockage qui résultent de l'objet étudié (stockage en profondeur) et de la question de déchets contenant des radionucléides de haute activité et à vie longue afin de concevoir, construire, exploiter et placer en phase après fermeture une installation de stockage garantissant l'atteinte des objectifs de sûreté que l'Andra s'est fixés. Elle doit garantir que les options de conception retenues, basées sur les connaissances scientifiques et technologiques disponibles, répondent aux exigences relatives au contexte intrinsèque du stockage qu'il soit sociopolitique, industriel ou réglementaire à prendre en compte à chacune des phases de vie du stockage.

Au vu des durées du cycle de vie de l'installation et de la décroissance radioactive des déchets qui impliquent la mobilisation de nombreuses disciplines (ingénierie minière et nucléaire, sûreté, sciences de la terre, des matériaux…) afin de caractériser les phénomènes susceptibles d'être rencontrés, la

démarche de sûreté identifie et cherche à réduire les risques et les incertitudes. A long terme, ces dernières sont notamment liées à la connaissance des phénomènes pouvant être rencontrés.

Ce processus itératif qui est cohérent avec le guide de sûreté permet aussi de démontrer l'acceptabilité des choix réalisés vis-à-vis de deux obligations apparemment antinomiques la réversibilité du stockage et la sûreté à long terme sans aucune intervention, qualifiée de "sûreté passive".

La démarche de sûreté s'intègre, ainsi, dans la démarche de conception en imposant la prise en compte d'exigences de sûreté à considérer pour choisir les options de conceptions et en réalisant une vérification de ces choix par le biais d'évaluations caractérisant le niveau de sûreté du stockage résultant de leur considération.

La Figure 1.5-1 suivante représente la démarche de sûreté telle que mise en œuvre à la conception du stockage et les exigences de sûreté à prendre en compte. Il est clairement distingué :

- l'identification des référentiels, des réglementations et des positions d'évaluateurs qui orientent les choix et les principes de conception et qui encadrent l'analyse de sûreté,
- la définition des objectifs de protection vis-à-vis de risques jugés dimensionnants pour l'installation,
- la compréhension du niveau de connaissance des déchets et des matériaux, du milieu géologique, du site, de leurs interactions,
- la compréhension scientifique de l'évolution thermique, hydraulique, mécanique, chimique et radiologique (THMCR) du stockage dans le temps et l'espace, ainsi que du couplage de ces différents phénomènes, s'appuyant notamment sur de multiples expérimentations en laboratoire et in situ, reproduisant les évolutions attendues et le recours à des analogues naturels pour de très longues échelles de temps (exemple : altération du verre en milieu géologique sur des centaines de milliers d'années),
- la connaissance de l'installation et de son site d'implantation s'appuyant notamment sur des démonstrateurs,
- l'identification des fonctions de sûreté pour toutes les phases de vie du stockage et les dispositions à prendre notamment en matière de prévention.

<u>L'étape d'évaluation qui doit démontrer que des choix de conception satisfont ces exigences</u> :

L'analyse des incertitudes après fermeture au travers de l'analyse qualitative de sûreté recense et évalue, composant par composant, les incertitudes concernant l'évolution du comportement du stockage identifiées dans l'Analyse Phénoménologique des Situations du Stockage (APSS) pour s'assurer qu'elles sont couvertes par des choix de conception ou dans des scénarios. L'APSS consiste, à partir de la description des installations et des connaissances scientifiques acquises, en une décomposition de l'évolution du stockage en situations, chacune correspondant à l'état phénoménologique thermique, hydraulique, chimique et mécanique mis en jeu (et leur couplage) d'une partie du stockage ou de son environnement à un moment donné.

L'évaluation des risques en exploitation du stockage susceptibles de nuire à la population, les travailleurs et l'environnement sont menées par le biais d'analyses de risques qui permettent d'identifier les situations de danger possibles dans le stockage, d'estimer et d'évaluer les risques sur l'homme et l'environnement des scénarios d'événements qui peuvent en résulter et mettre en place le cas échéant les dispositions de prévention et de protection nécessaires pour réduire ces risques.

Les analyses de risques en exploitation permettent ainsi d'identifier :

- les mesures de prévention, de détection, de protection ou de surveillance relatives à la sûreté de l'installation ou à la sécurité des travailleurs qui participent à l'accomplissement des fonctions de sûreté,
- les indicateurs qui caractérisent les fonctions relatives à la sûreté devant être accomplies par les barrières ainsi que les efficacités requises pour permettre le dimensionnement et la conception de ces barrières,
- les situations incidentelles et accidentelles les plus pénalisantes couvrant l'ensemble des situations redoutées résultant des scénarios d'événements identifiés.

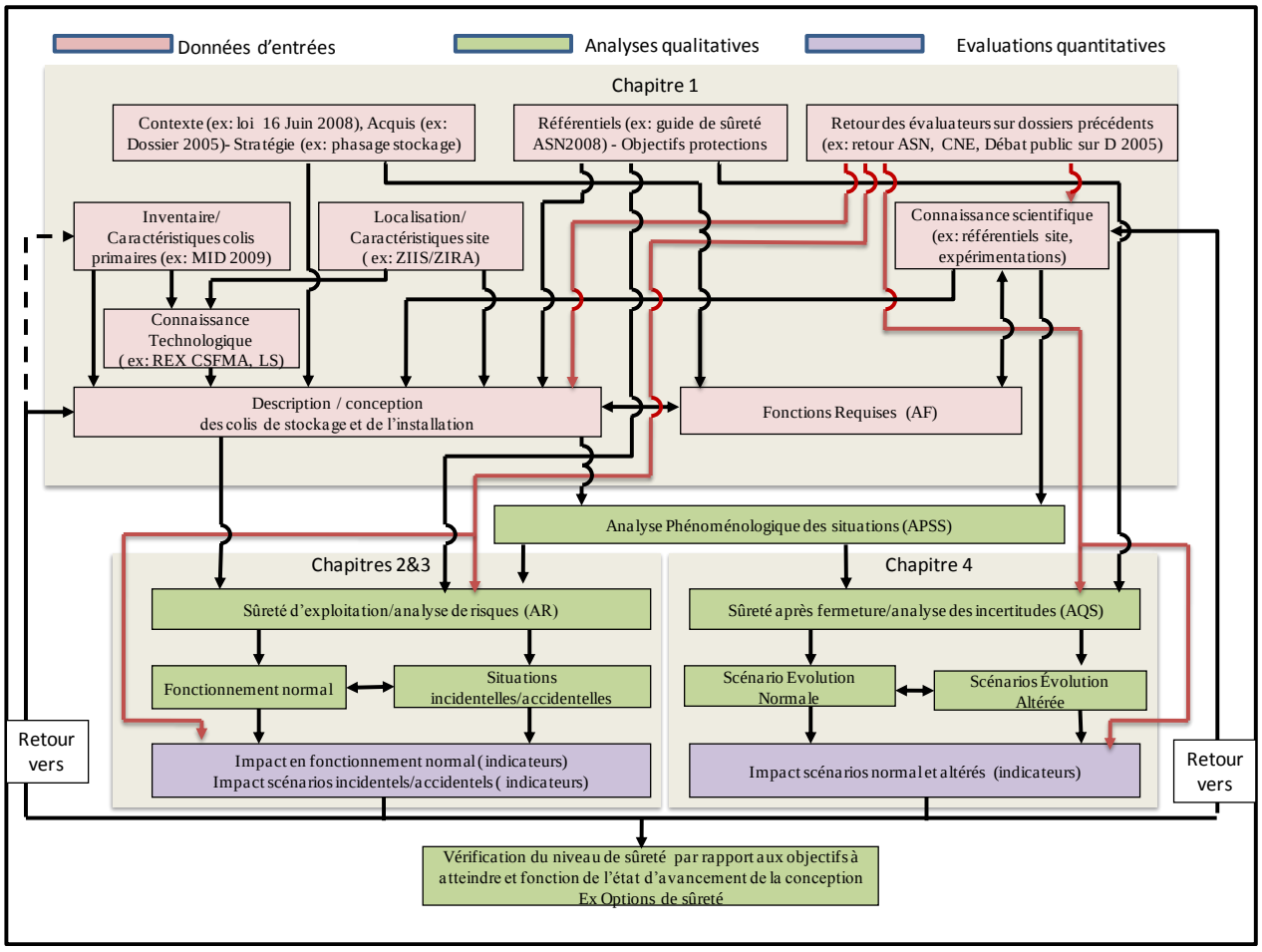


Figure 1.5-1 *Schéma illustrant la démarche de sûreté mise en œuvre pour toutes les phases de vie de l'installation*

Les analyses de risques constituent donc une validation a posteriori de la conception, en assurant que les fonctions attribuées aux différents composants du stockage par la sûreté sont effectivement remplies. Elles permettent ainsi de porter un jugement sur la validité des fonctions de sûreté du stockage et sur la robustesse d'ensemble du système. Ces deux analyses, menées en parallèle, débouchent sur des évaluations quantitatives en exploitation et après fermeture sous forme d'indicateurs caractérisant la performance globale du stockage, et l'impact du stockage sur l'homme et l'environnement pour chaque scénario identifié.

1.5.2 Une gestion coordonnée des risques en exploitation et à long terme

Bien que la démonstration de sûreté après fermeture ait une place centrale dans le développement du stockage, dès la conception, on ne doit pas négliger pour autant les exigences en phase exploitation. In fine la conception du stockage résulte de la combinaison des exigences de sûreté relatives à ces deux phases (cf. Figure 1.5-2) :

En phase exploitation, l'analyse de sûreté est dite « conventionnelle » et suit les mêmes pratiques industrielles qu'une installation nucléaire de base. Durant la phase d'exploitation d'un stockage, la sûreté relève donc d'une approche opérationnelle classique, commune à d'autres installations de même nature. La principale complexité réside dans la coexistence d'activités minières et nucléaires. L'atteinte d'un haut niveau de sûreté dépend principalement des dispositions de conception, de la compétence et de la vigilance permanente des équipes en charge du stockage. L'objectif est d'évaluer les risques nucléaires et non nucléaires d'origine interne et externe (exposition du personnel aux rayonnements, contamination lors d'une chute de colis, accident corporel de circulation, incendie…), de manière à réduire soit leur occurrence soit d'en limiter les conséquences. Cette démarche devra être

adaptée pour l'installation de stockage qui est située à plus de 500 m de profondeur (espacements plus réduits que dans une installation classique, longueur de galeries, co-activité travaux miniers et exploitation nucléaire, exploitation réversible pendant au moins 100 ans…).

En phase après fermeture, l'analyse de sûreté est « spécifique » dans la mesure où elle doit être assurée sur des échelles de temps très longues (au delà de plusieurs milliers d'années). Elle est dite passive (minimisation de la charge pour les générations futures) et ne se fonde pas sur des moyens de surveillance et de contrôle qui ne peuvent pas être garantis sur des échelles de temps aussi longues (perte de mémoire). Cela implique une maîtrise des solutions technologiques et une compréhension de l'évolution du stockage (état des connaissances/niveau d'incertitudes) pour rendre le stockage le plus robuste possible aux événements internes (défaillances de composants) et externes (intrusions d'origine humaine, événements naturels) susceptibles d'intervenir sur des échelles de temps supérieures au millier d'années.

1.5.2.1 La gestion des risques en exploitation

Afin de garantir la maîtrise dans le temps du niveau spécifié de sûreté initial des installations, certains principes directeurs de sûreté en exploitation sont identifiés en relation avec les objectifs de base. Ces principes sont :

- la passivité : la conception et le fonctionnement reposent sur des composants aussi simples et passifs que techniquement possibles. De ce fait, les risques de défaillance de ces composants sont minimisés, ce qui limite les besoins d'intervention générateurs de risques et évite une diminution du niveau de sûreté de l'installation (liée à une défaillance des composants requis pour assurer les fonctions de sûreté),
- la prise en compte à la conception des processus de vieillissement compte tenu de la durée de l'installation de façon à conférer des marges de sûreté suffisantes à l'installation,
- la minimisation de la charge aux générations futures (charges de maintenance, de surveillance et de reprise des colis, déchets) du fait de l'élaboration, lors de la conception, de programmes de maintenance et de surveillance adaptés,
- l'intégrité des colis de stockage à l'issue de la phase d'exploitation notamment dans le cadre d'éventuelles opérations de retrait (Andra, 2009b),
- la traçabilité et la conservation des informations concernant les colis de stockage sur toute la durée de l'exploitation.

Sans préjuger de la sûreté et de la robustesse intrinsèques du stockage résultant de l'application de ces principes, la gestion des risques en exploitation repose quant à elle sur l'application des principes de sûreté suivants : interposition de barrières entre les produits radioactifs et le personnel, le public et l'environnement et mise en œuvre du principe de défense en profondeur (voir paragraphe 1.5.4) qui prend en compte l'éventualité de défaillances techniques et humaines et qui requiert la mise en place de lignes de défense pour y faire face et en limiter les conséquences. La sûreté et la sécurité du stockage sont donc démontrées dès lors que des dispositions de prévention et de protection successives et graduées sont identifiées, dimensionnées et implantées pour réduire à un niveau acceptable les risques de nuisance des travailleurs, du public ou de l'environnement pouvant résulter de l'occurrence de situations de fonctionnement normal, incidentel ou accidentelles du stockage.

Cette démonstration est le résultat de l'application de la démarche de sûreté présentée au paragraphe 1.5.1.

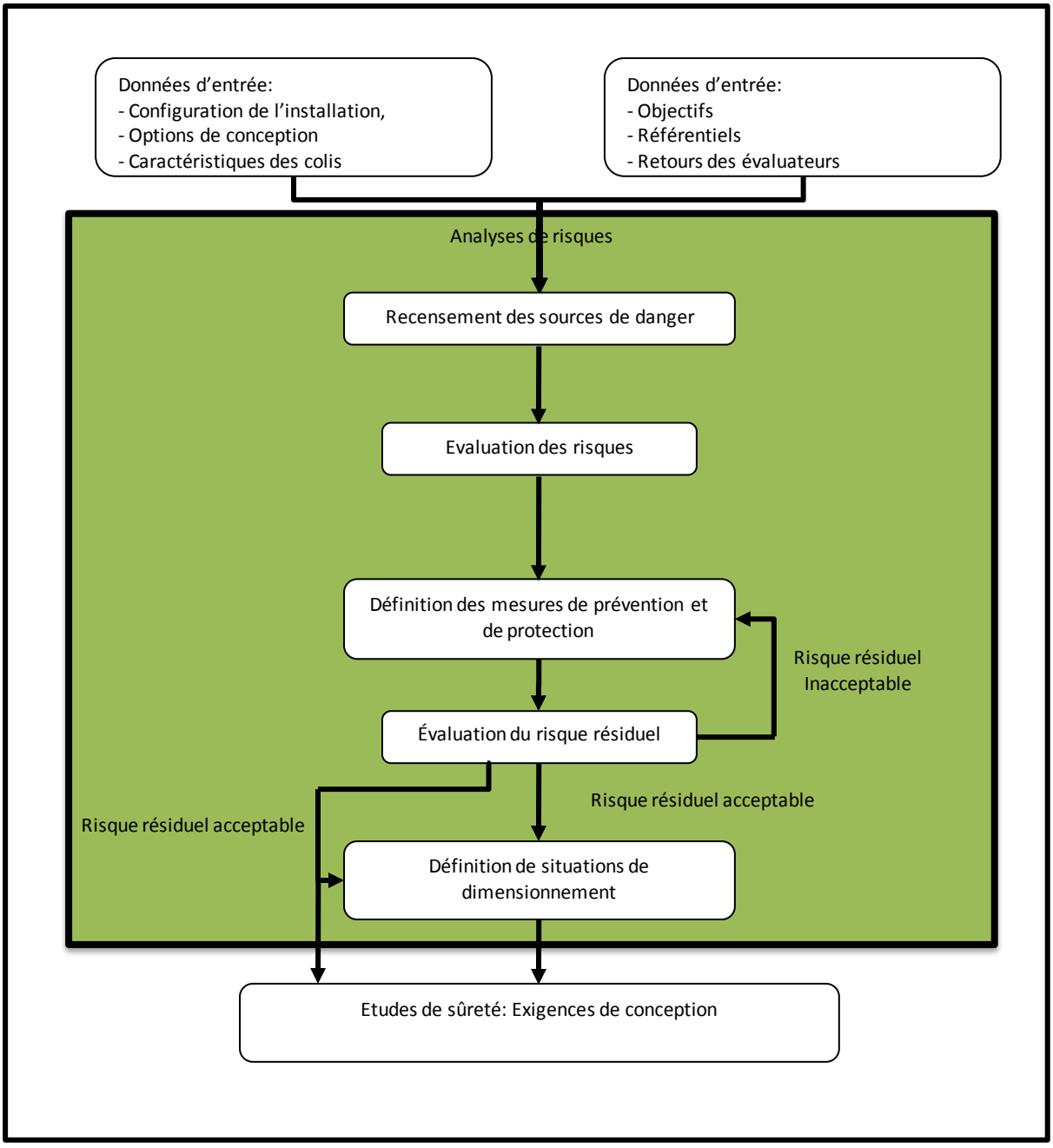


Figure 1.5-2 Les différentes étapes de l'analyse de risques

Les mesures de maîtrise des risques, qu'ils soient nucléaires, non nucléaires d'origine interne ou d'origine externe sont identifiés en termes de :

- moyens techniques et organisationnels pour prévenir les incidents dès la conception par le dimensionnement des installations et la proposition de mesures de prévention en prenant en compte les défaillances possibles des matériels et des hommes et les agressions externes,
- moyens de surveillance des installations et équipements pour détecter les dérives de fonctionnement éventuelles et les corriger par des systèmes automatiques ou par l'action d'opérateurs, le système restant ainsi dans son domaine normal de fonctionnement,
- mesures de protection à mettre en œuvre pour limiter les conséquences de la situation de fonctionnement incidentelle ou accidentelle du stockage qui résulteraient d'une défaillance des mesures de prévention et de surveillance et pour en réduire la gravité.

L'analyse commence par l'identification des sources de danger associées aux activités du stockage. Cette identification est réalisée avec l'appui d'experts dans les différents domaines techniques concernés (installations nucléaires, équipements de transport en puits, tunnels souterrains…) qui utilisent des listes-type de dangers[5] et qui apportent leur expérience relative à des installations comparables.

L'analyse est structurée par composantes physiques (installations de surface, puits d'accès, installations souterraines) et par phases de vie (construction, exploitation, fermeture) et cherche à fournir une vision la plus exhaustive possible, à ce stade des études, des risques susceptibles d'être encourus par le personnel, le public et l'environnement quelle que soit la configuration du stockage.

Un risque est défini par une source de danger et est caractérisé par l'évaluation de la gravité de son impact et de sa probabilité d'occurrence.

L'évaluation des risques intrinsèques à une configuration du stockage (résultant du choix d'option de conception et d'exploitation à un stade donné de l'avancement du projet ainsi que des phases de vie retenues) consiste à estimer la probabilité et la gravité de chaque risque et à juger du niveau d'acceptabilité à partir d'un jugement qualitatif au travers d'une grille de criticité.

Cette évaluation permet ainsi selon l'étape du développement du projet et en particulier le niveau de description de l'installation de proposer et/ou confirmer les mesures de prévention en termes d'options de conception notamment pour empêcher ou minimiser l'apparition du risque ainsi que des mesures de protection, qui interviennent pour en annuler ou limiter les effets. Les mesures de surveillance complètent les options de conception.

L'efficacité et donc la pertinence du choix des mesures mises en place sont évaluées à partir d'un jugement qualitatif du niveau de risque résiduel (caractérisé par sa probabilité et sa gravité) qui subsiste malgré la mise en place de mesures de réduction de risque proposées.

Une fois les mesures de prévention et de protection identifiées, celles-ci seront dimensionnées de manière à ce que les exigences de sûreté et de sécurité soient atteintes pour toutes les situations normales/incidentelles/accidentelles susceptibles d'être rencontrées. Dans ce but, les analyses de risques identifient les situations les plus pénalisantes, communément appelés situations de dimensionnement, couvrant l'ensemble des situations redoutées. Ces situations de dimensionnement sont généralement classées :

- par niveau de défense en profondeur : les situations de dimensionnement sont définies et classées par niveau de défense en profondeur compte tenu du fait que les caractéristiques des barrières, les règles d'études, les incertitudes entachant les données d'entrée et les méthodes utilisées pour les études des situations de dimensionnement sont différentes pour chaque niveau de défense en profondeur,
- par type d'impact ou de conséquences sur une barrière : une situation de dimensionnement est donc la situation normale/incidentelle/accidentelle la plus pénalisante vis-à-vis de la tenue et de l'efficacité d'une barrière identifiée parmi l'ensemble des situations générant le même type de phénomènes physiques ou chimiques impactant cette barrière.

En fonction de leur occurrence et de leur gravité, une hiérarchisation des situations de dimensionnement est réalisée à partir de l'identification des risques qui leur sont associés et de leur évaluation par rapport à la quantification des objectifs de sûreté pour les travailleurs ainsi que pour le public et l'environnement retenue par l'Andra pour les différentes catégories de situations de fonctionnement évoquées.

Dans le but de s'assurer de l'absence d'effet falaise, c'est-à-dire d'apparition d'un phénomène incontrôlable générant des conséquences inacceptables en terme de sûreté ou de sécurité, les

[5] Parmi les listes-type de dangers, la liste MADS (Méthode d'Analyse des Défaillances des Systèmes) et la liste MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques) sont le plus couramment utilisées pour une analyse de risque d'une installation industrielle.

situations de dimensionnement identifiées comme improbables mais dont la gravité est importante sont retenues et définies comme des situations « hors dimensionnement ».

1.5.2.2 La gestion des incertitudes à long terme

La sûreté du stockage est spécifique dans la mesure où elle doit être garantie à très long terme et doit donc être assurée sans intervention « sûreté passive », le plus rapidement possible après fermeture. Elle ne se fonde pas sur des moyens de surveillance et de contrôle qui ne peuvent pas être garantis à long terme. Cela implique une maîtrise des solutions technologiques pour rendre le stockage le plus robuste possible aux perturbations internes (défaillances de composants) et externes (intrusions d'origine humaine, événements naturels) intervenant sur des échelles de temps supérieures au millier d'années. Pour cela, l'analyse de sûreté après fermeture et les options de sûreté résultantes se fondent sur :

- La description des installations et des connaissances scientifiques acquises. Elle se fonde sur une compréhension de l'évolution du comportement du stockage dans le temps traduite au travers d'une Analyse Phénoménologique des Situations du Stockage (APSS) après fermeture mais aussi en phase exploitation, cette dernière permettant de définir l'état initial des colis et de leur environnement au moment de la fermeture. L'APSS consiste en une décomposition de l'évolution du stockage en situations, chacune correspondant à l'état phénoménologique thermique, hydraulique, chimique et mécanique mis en jeu (et leur couplage) d'une partie du stockage ou de son environnement à un moment donné.
- L'analyse qualitative de sûreté qui recense et évalue, les risques liés aux incertitudes sur le comportement des composants identifiées par l'APSS et ceux liés aux événements d'origine externe pour s'assurer qu'ils sont couverts par des choix de conception ou dans des scénarios. L'analyse qualitative établie pour le dossier 2005 a été revisitée au regard des évolutions de la conception (alvéoles MAVL passantes, descenderie…), et de l'avancée des connaissances scientifiques (EDZ, comportement mécanique des structures…).
- Les évaluations quantitatives sous forme d'indicateurs caractérisant la performance globale, et l'impact éventuel du stockage sur l'homme et l'environnement pour chaque scénario identifié. Toute évolution de l'architecture globale dite architecture à terminaison fait l'objet d'une réévaluation en utilisant l'indicateur le plus pertinent permettant de vérifier que la performance est toujours garantie.

L'évaluation permet ainsi de porter un jugement sur le niveau de réalisation des fonctions de sûreté du stockage et sur la robustesse d'ensemble du système et de vérifier à chaque étape que la sûreté après fermeture est toujours maîtrisée. Au stade de 2009, l'analyse de sûreté après fermeture présentée au chapitre 4 permet ainsi de confirmer les acquis du Dossier 2005, de vérifier que les nouvelles options de conceptions respectent toujours les exigences de la sûreté à long terme et in fine de confirmer les scénarios qui seront quantifiés pour la DAC.

Elle constitue une validation a posteriori de la conception, en assurant que les fonctions attribuées aux différents composants du stockage par la sûreté sont effectivement remplies. Elle s'inscrit aussi dans une approche itérative et de progrès. En mettant en perspective les différents phénomènes et en jaugeant leur importance quantitative, elle contribue à évaluer leur poids relatif et les conséquences des éventuelles incertitudes qui subsistent. Elle oriente les recherches et développements ultérieurs en mettant en lumière les domaines où des avancées scientifiques ou technologiques contribueraient le plus fortement à la sûreté.

<u>L'évaluation qualitative – les indicateurs de sûreté à long terme</u>

La gestion des incertitudes, au cœur de l'analyse de sûreté du Dossier 2005 et réévaluée au stade de 2009, contribue à la conception et à la définition des scénarios d'évolutions normale et altérées selon trois modalités successives de maîtrise des incertitudes qui sont :

- des choix de conception du stockage au moyen de dispositions techniques qui rendent le système robuste vis-à-vis de ces incertitudes : à titre illustratif, choix d'un milieu géologique stable très peu affecté depuis son dépôt il y a 150 millions d'années, fractionnement du stockage en sous zones pour éviter les interactions entre déchets de natures différentes, recours à des matériaux simples

dont on connaît le comportement (acier non allié, béton, etc.) et recours par exemple à un surconteneur pour se prémunir des incertitudes sur la migration des radionucléides en environnement thermique,
- des évaluations des performances du stockage intégrant des cas de sensibilité pour le scénario d'évolution normale,
- des scénarios d'évolution altérée (SEA) intégrant aussi des cas de sensibilité.

C'est l'Analyse Qualitative de Sûreté (AQS) qui permet de recenser et d'évaluer de manière systématique, composant par composant, au regard de leurs fonctions de sûreté, les incertitudes et ainsi de s'assurer que l'ensemble de ces incertitudes a été pris en compte selon les trois modalités de gestion précitées.

L'analyse conduit ainsi à examiner :

- quels composants sont concernés par l'incertitude, avec les effets induits d'un composant sur l'autre par le biais d'une perturbation,
- quelles performances de quelles fonctions de sûreté peuvent s'en trouver altérées. Une appréciation qualitative, argumentée en s'appuyant le cas échéant sur des calculs spécifiques est portée sur le risque de diminution significative des performances attendues,
- la période de temps concernée en lien avec l'APSS, si une telle information est utile.

<u>L'évaluation quantitative</u>

L'évaluation quantitative à long terme d'un stockage s'appuie sur des indicateurs, dont la valeur de dose obtenue à un exutoire (cf. section 1.5.3), qui permettent :

- de vérifier que les fonctions de sûreté sont satisfaites indépendamment des évaluations de dose, et qu'elles permettent de gérer les différents radionucléides au regard de leurs caractéristiques,
- de comprendre le fonctionnement individuel de chaque composant vis-à-vis des transferts et d'évaluer leur performance au regard des fonctions qui leur sont allouées,
- de s'affranchir de certaines incertitudes. Par exemple, l'indicateur « flux de radionucléides à la sortie de la formation-hôte » est, au contraire de la dose, indépendant des incertitudes sur les formations encaissantes et la biosphère.

Les indicateurs utilisés autres que la dose sont :

- la répartition en pourcentage entre les flux convectifs et diffusifs dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien. Ces indicateurs sont utilisés pour évaluer la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » et « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage »,
- la répartition entre la masse de radionucléides transitant le long et/ou dans les ouvrages constitués par les galeries et les puits et la masse migrant par diffusion dans le Callovo-Oxfordien, pour apprécier les voies de transfert (cf. Figure 1.5-3) : les quantités d'activité émises ou relâchées par les colis, les ouvrages, la formation-hôte sur la durée de l'analyse par rapport à la quantité initiale dans les colis. Cet indicateur est approprié pour évaluer les fonctions « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides »,
- les débits d'activité au cours du temps à la sortie de chacun des composants (colis, alvéoles, scellements, formation-hôte). Ces débits d'activité permettent d'estimer la capacité d'atténuation des différents composants, en particulier de la formation hôte (cf. Figure 1.2-1). Cet indicateur permet d'apprécier les performances de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». De manière plus précise, sont considérés : i) l'atténuation des radionucléides c'est-à-dire la fraction de la masse qui ne sort pas de la (ou des) barrière(s) considérée(s), ii) la date d'occurrence des maxima de débit molaire, indicateur pertinent pour les radionucléides à vie très longue pour lesquels la décroissance joue peu, iii) l'atténuation des maxima de débit molaire en sortie des composants,
- la cartographie des concentrations en solution dans la formation-hôte et dans les formations encaissantes, notamment dans les horizons aquifères. Cela permet de visualiser, à différentes dates, le cheminement des solutés. La comparaison des masses de solutés qui migrent hors de

l'alvéole, ramenées aux masses relâchées, illustre les effets de la précipitation pour assurer la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ».

Bien que les radionucléides de période inférieure à 1 000 ans décroissent totalement dans le stockage en évolution normale, ils sont analysés le cas échéant en situation altérée. Selon la période radioactive des radionucléides (et toxiques) et de leur comportement en solution, les indicateurs représentatifs de leur mode de gestion et cités ci-avant sont évalués.

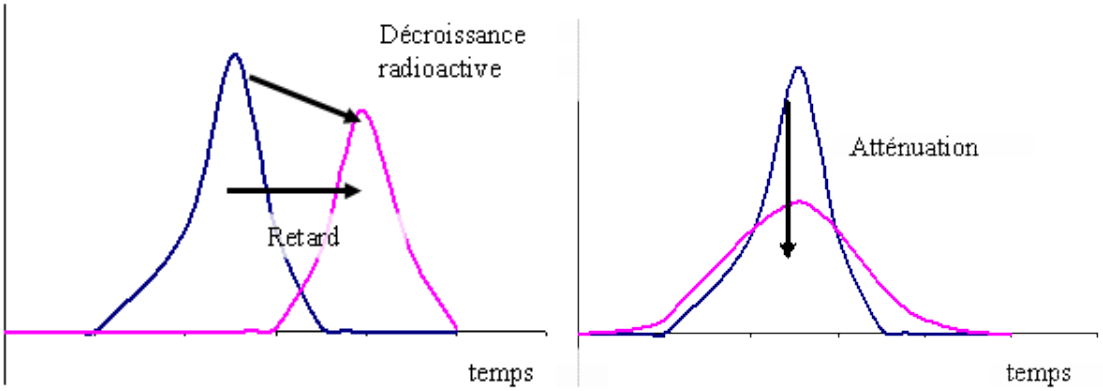


Figure 1.5-3 *Selon la période radioactive du radionucléide et son comportement en solution (radionucléides et toxiques) : des indicateurs représentatifs de leur mode de gestion.*

1.5.3 Démarche relative à la biosphère

La biosphère n'a pas de fonction de sûreté mais elle constitue le dernier maillon pour modéliser les transferts des radionucléides et des toxiques chimiques vers l'homme depuis une eau potentiellement contaminée et calculer leurs impacts.

En cohérence avec les référentiels et tout en restant cohérent avec la démarche BIOMASS de l'AIEA, la démarche de choix et description d'une ou plusieurs biosphère(s) qui sera appliquée pour les calculs d'impact de la DAC et après le choix de site en particulier pour le choix de la biosphère locale et du groupe de référence en phase exploitation se décline par :

La définition du contexte de l'évaluation *(Etape 1,* cf. Figure 1.5-4). Il s'agit de définir les éléments fondamentaux des évaluations à conduire qui peuvent influencer les choix à faire vis-à-vis de la biosphère : les échelles de temps relatives à chaque phase de vie du stockage, les référentiels applicables, le site, les objectifs de l'évaluation et les indicateurs de sûreté et d'impact retenus.

Le choix de la ou des biosphère(s) type(s) *(Etape 2,* cf. Figure 1.5-4). La démarche conduit à distinguer de façon conventionnelle :

- les phases d'exploitation et de surveillance (court terme, i.e. quelques centaines d'années), pour lesquelles on retiendrait une biosphère de type tempéré qui peut être considérée constante sur la période donnée,
- la phase après fermeture pour laquelle les échelles de temps sont plus longues (au-delà de quelques centaines d'années jusqu'à 1Ma). Sur de telles périodes, une ou des biosphère(s) type(s) seraient à sélectionner à partir des résultats de modélisations prenant en compte les évolutions climatiques globales et leurs conséquences sur l'environnement de surface.

Lorsque la liste des biosphères types plausibles est définie, l'approche consiste à retenir pour les évaluations les différentes biosphères types possibles sur la durée et les dates considérées dans le futur en regard de leur pertinence vis-à-vis du contexte de l'évaluation et en particulier du scénario de sûreté considéré. Les biosphères types susceptibles d'exister pendant la période concernée pour l'évaluation sont à considérer individuellement sans prendre en compte leur enchaînement au cours du temps.

Ces biosphères sont à traiter de manière équiprobable. L'approche conduit ainsi à décrire un modèle conceptuel pour chacune des biosphères types sélectionnées.

Lorsque le choix des biosphères types à retenir pour l'évaluation est fait, la description phénoménologique de ces biosphères est réalisée. Celle-ci conduit à décrire les composantes de la biosphère type (climat, végétation, faune, sols, géomorphologie, géologie, hydrologie et hydrogéologie, et activités humaines) afin de tracer l'ensemble des caractéristiques plausibles de chacune de ces composantes tout en tenant compte des voies d'exposition potentielles d'individus.

L'identification et la justification des compartiments du modèle conceptuel (Etape 3, cf. Figure 1.5-4), c'est-à-dire la description de la biosphère de référence pour chaque biosphère type retenue pour les évaluations à conduire. Cette étape conduit à la sélection de l'ensemble des composantes à introduire dans le modèle en tenant compte du contexte de l'évaluation.

Cela implique :

Le choix des exutoires. La démarche conduit à :

- retenir le ou les exutoire(s) et leurs localisations en cohérence avec les modèles hydrogéologiques et de transport des radionucléides lorsque le site ou la région d'implantation sont connus et les données disponibles. Le choix du ou des exutoire(s) alimentant le ou les groupe(s) de référence actuel(s) ou hypothétique(s) est alors effectué parmi les exutoires identifiés pour l'actuel ou pronostiqués pour le futur d'après les modélisations,
- le cas échéant, choisir de manière conventionnelle, un ou des exutoire(s) dont la localisation est dépendante des situations à considérer et des activités du ou de ces groupe(s) de référence actuel(s) ou hypothétique(s).

Le choix des groupes de référence actuels ou hypothétiques. La démarche s'appuie sur une stratégie dite a priori qui consiste :

- à considérer a priori plusieurs groupes exposés potentiels avec des comportements représentatifs des habitudes et ressources de la biosphère dans son cadre régional ou du site si celui-ci est défini (par exemple, groupes de pêcheurs, agriculteurs, villageois) en tant qu'indicateur de l'exposition potentielle maximale,
- puis à décrire un individu représentatif de chacun des groupes sélectionnés, par sa classe d'âge, ses voies d'exposition et son comportement alimentaire en distinguant :
  - ✓ un groupe ou individu potentiellement soumis à une voie d'exposition particulière du fait de son activité spécifique. La consommation plus importante d'un produit de son activité conduit à adopter un régime alimentaire particulier. Toutefois l'approche ne retient pas de comportements extrêmes définis pour des comportements peu réalistes (consommation élevée de plus de 3 types d'aliments selon la méthode BIOMASS),
  - ✓ un groupe ou individu potentiellement soumis à l'ensemble des voies d'exposition du fait de ses multiples activités (un jardin potager, une basse cour, un élevage…). Ces activités le conduisent à une voie d'exposition par ingestion par la consommation de divers produits animaux et végétaux en autarcie, et aux voies d'exposition par inhalation et exposition externe du fait de ses activités extérieures. Dans ce cas, l'Andra retient un comportement moyen.

Pour la phase d'exploitation et de surveillance (quelques centaines d'années), le ou les groupe(s) de référence est/sont défini(s) par leur mode de vie actuel.

Pour la phase après fermeture (au-delà de quelques centaines d'années jusqu'à 1Ma), le ou les groupe(s) de référence hypothétique(s) est/sont défini(s) sur la base d'observation de biosphères représentatives des biosphères types retenues.

Le choix des autres composantes de la biosphère *(atmosphère, sol, animaux et végétaux).* La démarche de sélection de ces composantes distingue les phases de vie du Centre existant ou projet, à savoir :

- la phase d'exploitation et de surveillance (quelques centaines d'années), pour laquelle on retient les caractéristiques des composantes de la biosphère qui représentent les voies de transfert observées actuellement dans la région concernée en tenant compte de la localisation de l'exutoire et de l'exposition potentielle en lien avec les activités humaines,
- la phase après fermeture (au-delà de quelques centaines d'années jusqu'à 1Ma), pour laquelle on retient les composantes qui permettent d'explorer l'ensemble des voies de transfert de la région « représentative » de la biosphère type à considérer dans l'évaluation et de ses potentialités en tenant compte de la localisation de l'exutoire et de l'exposition potentielle en lien avec les activités humaines.

La modélisation des transferts de radionucléides ou toxiques vers l'homme (*Etape 4,* cf. Figure 1.5-4). La démarche consiste à décrire les voies de transfert associées à un exutoire « défini », c'est-à-dire localisé et caractérisé selon la démarche définie précédemment. Cette approche conduit à étudier séparément les conséquences liées à chacun des exutoires potentiels notamment au regard d'activités spécifiques du groupe de référence (pour le court terme) ou du ou des groupe(s) hypothétique(s) (pour le long terme). Cette approche permet, par exemple, d'explorer des voies de transfert spécifiques vers l'homme depuis une eau potentiellement contaminée.

Si la possibilité d'utiliser plusieurs types d'exutoires simultanément par un groupe de référence actuel ou hypothétique apparaît, l'approche consistera :

- à examiner la vraisemblance d'un scénario qui aurait différents types d'exutoires simultanément, et de spécifier le cas échéant les choix qui pourraient être faits à titre conventionnel,
- à préserver un certain réalisme vis-à-vis des caractéristiques (Temps/Espace/Usage/Débits) des exutoires et des activités des groupes de référence actuels ou hypothétiques, notamment dans la prise en compte des résultats de la modélisation hydrogéologique, de la modélisation du transfert des radionucléides, et de l'évolution de la concentration en fonction du temps.

La construction des modèles numériques en vue des quantifications (Etape 5, Figure 1.5-4) qui inclut le choix des modèles dont certains peuvent être spécifiques à certains radionucléides. En termes de modélisation des transferts dans la biosphère, l'Andra retient :

- pour tous les radionucléides, excepté ^{36}Cl, ^{3}H et ^{14}C, un modèle compartimental utilisant des facteurs de transfert entre compartiments à l'équilibre,
  pour ^{36}Cl, ^{3}H et ^{14}C, un modèle de transfert spécifique basé sur la dilution isotopique.

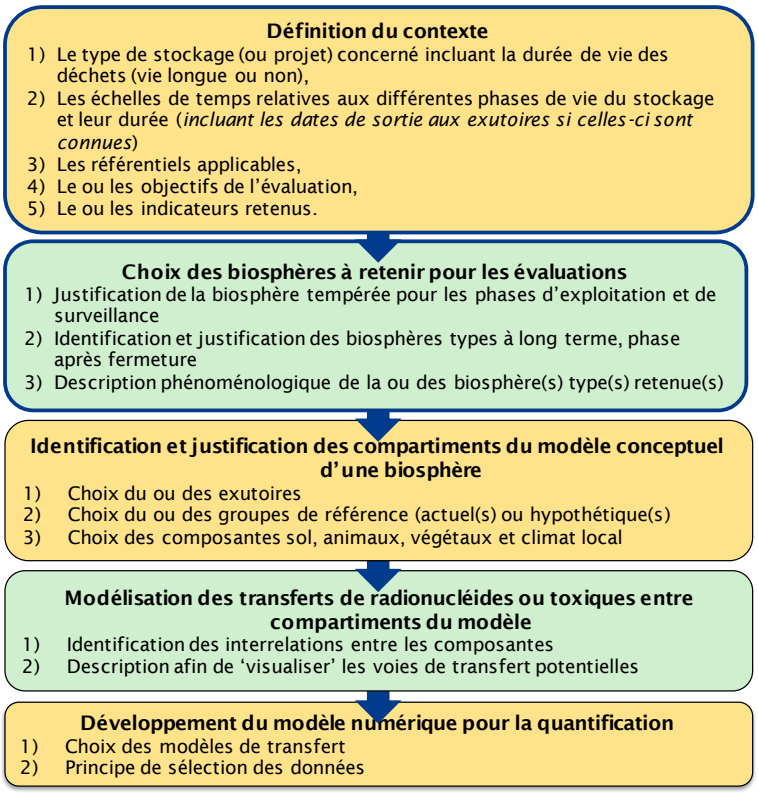


Figure 1.5-4 *Schéma illustrant les différentes étapes de choix et de description d'une biosphère*

1.5.4 La mise en œuvre du principe de défense en profondeur

Rappel du Principe

La défense en profondeur est un principe de sûreté internationalement reconnu mis en œuvre à la conception et lors de l'exploitation d'une installation présentant des risques pour les populations, les travailleurs ou l'environnement afin de lui garantir un niveau de sûreté et de sécurité conforme aux objectifs fixés. Il consiste à interposer entre la source de danger (ex : la matière radioactive ou toxique) et le public, les travailleurs ou l'environnement un nombre suffisant de dispositions éliminant ou limitant jusqu'à un niveau acceptable les nuisances possibles liées à cette source.

La définition du nombre et des caractéristiques de ces dispositions (techniques et organisationnelles) doit être en adéquation avec le type et les nuisances de la source de danger ainsi qu'avec les possibles situations d'exposition à cette source du public, des travailleurs ou de l'environnement. Le principe de défense en profondeur fige 5 niveaux de défense successifs et les objectifs associés cohérents avec les conséquences pouvant résulter de la perte ou de la défaillance des dispositions des niveaux précédents. Ceux-ci son présentés dans le Tableau 1.5-1 ci-après :

Tableau 1.5-1 *Niveaux de défense en profondeur*

Niveau	Objectif	Type de barrière
1	Prévenir le fonctionnement anormal de l'installation et les défaillances des équipements	Equipements opérationnels de conception conservative et de haute qualité
2	Prévenir le fonctionnement anormal et détecter les défaillances	Systèmes de détection, de limitation et de contrôle, Procédure de surveillance
3	Contrôler et gérer les accidents résultant d'un fonctionnement anormal de l'installation	Système de sauvegarde, Procédure de gestion accidentelle
4	Contrôler et gérer les conditions accidentelles sévères de l'installation Eviter le relâchement de matière radioactive à l'extérieur de l'installation	Moyens de protection complémentaire Procédure de gestion post accidentelle

Niveau	Objectif	Type de barrière
5	Limiter les conséquences radiologiques sur les populations et l'environnement de relâchement significatif de matière radioactives à l'extérieur de l'installation	Plans d'urgence

Il faut noter que l'existence de plusieurs niveaux de défense en profondeur ne justifie en aucun cas l'indisponibilité ou l'absence d'un de ces niveaux. Toutes les barrières ou dispositions mises en œuvre au titre de défense en profondeur doivent être disponibles lorsque celles-ci sont requises pour la démonstration de sûreté de l'installation.

Application aux installations souterraines de stockage des déchets radioactifs

La particularité des installations souterraines de stockage des déchets radioactifs par rapport à d'autres installations nucléaires réside dans sa phase après fermeture pouvant s'étaler sur de très longues durées.

Au premier niveau, l'Andra réalise une identification aussi systématique que possible des incertitudes sur le comportement du stockage et de son environnement aussi bien sur le court que sur le long terme. Pour réduire l'impact de ces incertitudes, on recherche des dispositions de conception favorables dans l'architecture du stockage ; cela comprend en particulier des marges conservatives dans le dimensionnement du stockage. A titre d'exemple, concernant les déchets de haute activité, même si le verre est un matériau performant, il subsiste des incertitudes sur son comportement pendant les tout premiers siècles du stockage qui se caractérisent par une température relativement élevée. Pour pallier ces incertitudes, l'Andra propose d'ajouter un surconteneur étanche en acier épais protégeant ainsi le verre. Les risques de défaut de fabrication et d'incidents sont analysés méthodiquement. Dans le même esprit que pour la gestion des incertitudes, on cherche à minimiser ces risques dans les choix de conception : mise en œuvre de procédés permettant de réduire l'occurrence de ces risques, solutions technologiques fiables et éprouvées, ajout de marges et de redondances en tant que de besoin. A titre illustratif, depuis le dossier 2005, l'Andra a cherché à réduire le risque de chute lors de la manutention de certains conteneurs de déchets MAVL dans une alvéole souterraine de stockage : les procédés étudiés aujourd'hui diminuent fortement la hauteur de survol.

Au deuxième niveau, la démarche de sûreté comprend la mise en place d'actions de surveillance : les colis de déchets seront surveillés et contrôlés avant leur mise en stockage ; cela comprend les déchets eux-mêmes mais aussi les conteneurs et les matrices dans lesquels les déchets sont conditionnés. Le dispositif de surveillance fait appel à de multiples modes de contrôles comme c'est déjà le cas pour les colis de déchets au centre de l'Aube. Une fois le colis produit, il continue à être surveillé en entreposage ; de nouvelles étapes de contrôles seront mises en œuvre avant la livraison sur le site et la mise en stockage (prélèvement de colis, de déchets, analyses par l'Andra pour vérifier les principaux paramètres de sûreté, pour l'exploitation comme à long terme...). Un colis ne sera donc stocké que s'il est démontré conforme aux exigences des spécifications d'acceptation en stockage (exigences telles que la résistance à la hauteur maximale de chute, le volume de vides résiduels, l'intégrité du conteneur, le débit de gaz, le niveau de contamination externe, le débit de dose...) et qu'il aura aussi répondu à l'ensemble du processus de contrôle de sa production à sa mise en alvéole. Les installations de stockage seront aussi surveillées par la mise en place de moyens de mesures et d'analyse pour vérifier le bon état des systèmes contribuant à la sûreté et le respect du domaine de fonctionnement spécifié. L'observation des ouvrages du stockage vise de manière générale à vérifier le comportement attendu et à amener des éléments de connaissance additionnels à ceux issus de la modélisation et des observations effectuées au préalable, notamment au Laboratoire souterrain, pour aider à la prise de décision au fur et à mesure du processus de stockage. A titre illustratif, on mesurera l'évolution des déformations dans les structures. La surveillance du stockage permet d'alerter en cas d'écart par rapport au domaine de fonctionnement et de réagir le plus en amont possible *a fortiori* en cas de risque immédiat, comme c'est le cas de la détection incendie. Elle vise aussi à détecter toute situation anormale par rapport au domaine de fonctionnement et à l'évolution attendue du stockage, qui pourrait générer à plus long terme un risque. Le cas échéant, elle permettrait de se donner le temps

d'évaluer la nouvelle donne et de réagir si nécessaire, pour ramener le stockage à une évolution normale.

Au troisième niveau, malgré les précautions prises, on doit enfin envisager dès la conception du stockage l'éventualité de défaillances et d'incidents. La démarche consiste alors en une identification de moyens (techniques ou organisationnels) pour limiter les effets sur les travailleurs, les populations et l'environnement en cas d'incident. Ces moyens comprennent par exemple la résistance des colis de stockage, la mise en place d'écrans de radioprotection, la mise en place d'une ventilation permettant de canaliser, de contrôler et de traiter les éventuels rejets accidentels. On apprécie l'efficacité de ces moyens en évaluant l'impact de situations accidentelles et en vérifiant que cet impact reste acceptable à court et long terme. Par ailleurs, les études de sûreté après fermeture du stockage intègrent dès la conception l'éventualité de colis défaillants par la prise en compte dans un scénario de sûreté de colis supposés défaillants.

Au quatrième niveau, si suite à un incident le stockage se trouvait dans une situation qui n'est pas acceptable à court terme ou ne le serait pas à long terme, on devrait alors envisager la possibilité d'intervenir. Une intervention consiste en la mise en place de moyens techniques et organisationnels pour remédier à cette situation et ramener le stockage dans un domaine de fonctionnement sûr. Par exemple dans le cas de colis non-conformes ou détériorés, ou d'incident de manutention, l'intervention pourrait aller le cas échéant jusqu'à récupérer des colis et les extraire du stockage, si nécessaire. La meilleure solution devra être retenue en fonction des risques et des avantages attendus de chaque option envisageable. Les démonstrations technologiques en situations dégradées contribuent à cette approche.

1.5.5 Prise en compte de la demande de réversibilité

La Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (Art. 2) indique :

- « La gestion durable des matières et des déchets radioactifs de toute nature, résultant notamment de l'exploitation ou du démantèlement d'installations utilisant des sources ou des matières radioactives, est assurée dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement.
- La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures. »

Après instruction de la demande d'autorisation de création du centre de stockage, une loi fixera les conditions de réversibilité. L'article 12 de la loi du 28 juin 2006 prévoit ainsi que « *la demande d'autorisation de création du centre donne lieu à un rapport de la commission nationale [d'évaluation], à un avis de l'Autorité de sûreté nucléaire et au recueil de l'avis des collectivités territoriales situées en tout ou partie dans une zone de consultation définie par décret* ». « *La demande est transmise, accompagnée du compte rendu du débat public, du rapport de la commission nationale [d'évaluation] et de l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire, à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, qui l'évalue et rend compte de ses travaux aux commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat* ». « *Le Gouvernement présente ensuite un projet de loi fixant les conditions de la réversibilité. Après promulgation de cette loi, l'autorisation de création du centre peut être délivrée par décret en Conseil d'Etat, pris après enquête publique* ». « *L'autorisation de création d'un centre de stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs ne garantissant pas la réversibilité de ce centre dans les conditions prévues par cette loi ne peut être délivrée* ».

« Lors de l'examen de la demande d'autorisation de création, la sûreté du centre est appréciée au regard des différentes étapes de sa gestion, y compris sa fermeture définitive. Seule une loi peut autoriser celle-ci. L'autorisation fixe la durée minimale pendant laquelle, à titre de précaution, la réversibilité du stockage doit être assurée. Cette durée ne peut être inférieure à cent ans ».

La traduction technique de la réversibilité comprend la possibilité de différer la fermeture des ouvrages. Pendant cette période, la protection des opérateurs, du public et de l'environnement mobilise des systèmes actifs à surveiller et à maintenir selon les objectifs de protection définis. Cela

implique de pouvoir transmettre entre générations successives des connaissances sur la conception, le fonctionnement, la maintenance et le comportement de l'installation. Le maintien des systèmes actifs a toutefois des limites dans le temps du fait du vieillissement possible de certaines structures au fil du temps. Cela pourrait se traduire par des limites sur la durée qui restent à définir pendant laquelle il serait raisonnable de différer la fermeture, particulièrement celle des alvéoles de stockage. Les dispositions de conception retenues au stade actuel pour faciliter les opérations de retrait éventuel des colis d'une alvéole sont présentées dans le document relatif aux options de réversibilité (Andra 2009b). Ce sont notamment :

- des interfaces de manutention sur les colis compatibles avec leur retrait éventuel de l'alvéole de stockage,
- une conception durable des alvéoles et des colis, y compris concernant leurs interfaces de manutention,
- des jeux de manutention faibles, limitant les besoins de remblayage autour des colis, mais suffisants pour permettre le retrait différé éventuel des colis de l'alvéole,
- la maîtrise des conditions d'environnement dans l'alvéole, de façon à préserver l'intégrité physique des colis et les jeux de manutention.

Comme indiqué dans le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (ASN, 2008), «... les dispositions prises pour assurer la réversibilité du stockage ne doivent pas compromettre la sûreté en exploitation et la sûreté après fermeture de l'installation de stockage ».

Dans le cas où certaines dispositions de conception favorables à la réversibilité seraient susceptibles d'impacter des fonctions liées à la sûreté après fermeture, des calculs d'évaluation devront montrer le caractère acceptable sur la sûreté après fermeture de ces dispositions. Il s'agira par exemple de vérifier que les éventuelles perturbations physico-chimiques de l'argilite liées à une période d'ouverture prolongée des ouvrages, ou que des éventuelles augmentations de la circulation d'eau dans le stockage liées à la conception réversible du stockage, ne modifient pas de manière significative la sûreté du stockage.

1.5.6 La gestion de la mémoire compte tenu des échelles de temps (exploitation et après fermeture)

Deux objectifs visés

Les dispositions techniques et organisationnelles qui seront prises pour gérer la mémoire visent deux objectifs.

Pendant l'exploitation, qui peut comprendre une période de latence liée à la réversibilité, la sûreté repose à la fois sur des dispositifs actifs et passifs. Une traçabilité des informations est nécessaire sur toute la durée de l'exploitation pour permettre un maintien de l'installation en état sûr (traçabilité des inventaires stockés y compris leur localisation), pouvoir agir en cas d'incident.

Après fermeture des installations souterraines de stockage, à long terme, la sûreté repose sur la capacité de la roche à confiner passivement sur une très longue durée les radioéléments pour toutes les situations envisagées (cf. chapitre 4). Le guide de sûreté (ASN, 2008) précise notamment que « *après la fermeture de l'installation de stockage, 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 être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée* ». La préservation de la mémoire après fermeture permet de retarder la date d'occurrence d'éventuelles intrusions humaines qui seraient rendues possibles par un oubli de l'existence du stockage.

Un référentiel de sûreté

Le guide de sûreté élaboré par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN, 2008) précise que :

« La sûreté du stockage après fermeture doit être assurée de façon passive afin de protéger les personnes et leur environnement, et [qu'] elle ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée » ;

« La mémoire de l'existence du stockage dépend de la pérennité des mesures qui peuvent être mises en œuvre lors de l'archivage et des documents institutionnels résultant de la réglementation ; dans ces conditions, la perte de mémoire de l'existence du stockage peut être raisonnablement située au-delà de 500 ans ».

Des acquis

L'Andra travaille à la possibilité de conserver la mémoire du stockage, au moins pendant 500 ans telle que mentionnée dans le guide de sûreté, et met en place les moyens pour la maintenir si possible au-delà. La solution de mémorisation à long terme mise en place pour les centres de surface (cf. Encadré) permet de conserver la mémoire du site sur une durée estimée d'au moins cinq siècles. Elle met en œuvre du papier de longue conservation, appelé « papier permanent ». Les documents décrivant complètement le stockage (mémoire détaillée) sont archivés en deux lieux distincts (sur le site de stockage et aux archives nationales). Par ailleurs un document unique (mémoire de synthèse) est plus largement diffusé aux niveaux international (Agence internationale pour l'énergie atomique, Communauté Européenne…), national (ministères, instances de contrôle…) et local (élus, administrations, chambres consulaires, études de notaires, associations, riverains…).

Encadré 1.5-1 La conservation de la mémoire pour les centres de stockage de surface

L'Andra a fait le choix, pour ses centres de surface, de définir des critères permettant de trier et de hiérarchiser les connaissances produites. Ces critères se fondent sur des scénarios auxquels pourraient être confrontées les générations futures, et prennent en compte un besoin pour d'éventuels historiens de comprendre les choix sociétaux et technologiques opérés par la génération actuelle et celles passées. Cette sélection de connaissances s'appelle la « mémoire détaillée » du centre de stockage. Elle sert essentiellement à pouvoir comprendre de façon approfondie le site et à le modifier, si nécessaire.

L'Andra a aussi fait le choix de réaliser un ouvrage unique de taille modeste (169 pages pour le Centre de stockage de la Manche), avec de nombreuses illustrations, appelé « mémoire de synthèse ». Cet ouvrage est destiné à être très largement diffusé auprès du public, des décideurs, des administrations, des associations, des notaires, etc. de sorte qu'il en subsiste « toujours » quelques exemplaires et que la connaissance soit maintenue. Il s'agit là d'une « défense en profondeur » qui permettra à tous ceux qui posséderont cette mémoire de synthèse de s'interroger globalement sur le centre, notamment si certains avaient envie de le modifier sans en connaître suffisamment le contenu.

En ce qui concerne les modalités (dont le support), la mémoire détaillée et la mémoire de synthèse stabilisées sont éditées sur du « papier permanent ». Les caractéristiques normalisées internationalement du papier permanent (pH légèrement basique, faible teneur en lignine, résistance élevée à la déchirure) lui confèrent une durabilité très supérieure à celle des papiers usuels. Des études commanditées par l'Andra entre 2007 et 2009 ont montré une durabilité de cette solution de l'ordre de huit siècles (plus ou moins deux), ce qui couvre la période règlementaire actuellement définie pour tous les stockages réalisés et à venir.

Conserver la mémoire du stockage ne se limite pas à se souvenir de son existence. Il s'agit aussi de maintenir disponibles les informations essentielles sur la nature des déchets stockés, leur localisation, et toute autre information jugée pertinente, de façon à permettre aux générations futures de disposer des éléments les plus utiles pour d'éventuelles nouvelles décisions relatives au stockage. L'Andra souhaite soumettre régulièrement la mémoire détaillée du stockage à une revue d'expertise pluraliste et internationale. L'objectif de ces revues régulières est d'appréhender de proche en proche et de façon intergénérationnelle les besoins des générations futures en termes de mémoire à long terme, et de consolider progressivement les solutions mises en place par l'Andra pour y répondre.

Une approche prudente au stade actuel avec des choix de conception et des scénarios envisagés

L'implantation en profondeur du stockage permet de s'affranchir des intrusions banales ; les différents cas d'intrusion humaine envisagés sont présentés dans le chapitre 4 et correspondent à des forages en

profondeur. L'occurrence d'intrusions est en outre limitée par le choix du Callovo-Oxfordien, exempt de ressources naturelles, et par la restriction des quantités utilisées de matériaux dans les composants manufacturés à des niveaux ne permettant pas le développement d'activités économiques rentables. En complément de ces précautions, en cas d'intrusion, les conséquences sont limitées par le choix d'une architecture conçue de manière à limiter la quantité de colis impactés, notamment par un fractionnement des modules de stockage, la mise en place de scellements , etc. Le chapitre 4 précise ces options permettant ainsi de limiter les conséquences d'une éventuelle intrusion. De plus, pour les calculs de sûreté, il est fait, par précaution, l'hypothèse d'un oubli du stockage dès 500 ans et d'une éventuelle intrusion humaine dans le stockage suite à cet oubli (scénario d'évolution altérée).

Des actions futures pour la DAC et au delà

L'Andra réfléchit dans le cadre des échanges engagés avec la communauté scientifique en sciences humaines et sociales à un espace de partage et de co-construction de l'information dans le cadre de la réversibilité. Le développement de ce type d'outil, en favorisant l'accès et la diffusion de l'information, permettrait de consolider la mémoire sur le stockage.

L'Andra participe à des réflexions internationales sur la possibilité de mémoriser le site sur une échelle de temps plus grande (à l'échelle millénaire telle qu'étudiée au Japon, et de dizaines de milliers d'années comme aux Etats-Unis). Certaines technologies étudiées pourraient durer des centaines de milliers d'années (disques en saphir).

Comme mentionné dans l'Encadré 1.5-1, conserver la mémoire du stockage ne se limite pas à se souvenir de son existence. Il s'agit aussi de maintenir disponibles les informations essentielles sur la nature des déchets stockés, leur localisation, et toute autre information jugée pertinente, de façon à permettre de disposer des éléments les plus utiles pour d'éventuelles nouvelles décisions relatives au stockage tout au long de l'exploitation (y compris son éventuelle prolongation liée à la réversibilité) et après fermeture. Un travail de sélection des données sera conduit pour identifier, parmi la masse d'informations qui seront acquises au fur et à mesure, celles qui devront être préservées, en fonction des échelles de temps à considérer. Ce travail s'appuiera sur le retour d'expériences de la mise en place de la mémoire détaillée et de son utilisation sur les centres existants.

Enfin, l'Andra structure actuellement un projet de « Centre de la mémoire des stockages de déchets radioactifs », dont un des objectifs majeurs sera de faciliter l'appropriation par les populations locales des centres et de leur mémoire. Ce projet pourrait faire appel à des disciplines très différentes comme :

- des archives numériques ou sur papiers normal ou permanent,
- des œuvres artistiques (contemporaines ou non) comme vecteur de transmission de la mémoire,
- un espace muséographique pour présenter l'évolution des technologies de stockage au fil des décennies puis des siècles où il s'est réalisé,
- la conservation d'échantillons de la biodiversité (sol, faune, flore, micro-organismes…) via une écothèque et d'échantillons des sous-sols via une géothèque,
- des recherches sur la linguistique (vieillissement et disparition des langues), la pérennité de différents supports, la symbolique, la création et la transmission des légendes, l'archéologie des paysages, etc.,
- les réflexions sur les besoins locaux, notamment la perception que l'on peut avoir des besoins des générations futures et lointaines.

1.6 Les données d'entrées

Conformément à la démarche présentée en 1.5, cette section présente les principales données d'entrées utilisées pour l'établissement des options de sûreté notamment les référentiels de sûreté (cf. sections 1.6.1.1 et 1.6.1.2) et les principales caractéristiques des colis (cf. § 1.6.7), du site (cf. §1.6.9) et des architectures de stockage (cf. 1.6.11). Les données colis, site et conception sont présentées en détail :

- dans le référentiel de connaissance et le modèle d'inventaire de dimensionnement pour ce qui concerne les colis,

- dans le référentiel de site qui présente l'état des connaissances du site,
- dans le document « options de conception » relatif à l'état d'avancement de la conception des installations de surface et souterraines.

Cette section termine par une synthèse des fonctions de sûreté en exploitation et à long terme et des recommandations associées.

1.6.1 Références externes applicables

De par son impact potentiel sur l'environnement, les populations et les travailleurs, une installation de stockage de déchets radioactifs doit être conçue, installée, exploitée, mise à l'arrêt et surveillée conformément à la réglementation en vigueur.

Cette réglementation est constituée de codes, lois, décrets, arrêtés et circulaires qui définissent les acteurs, les démarches d'analyses à mettre en œuvre, les démonstrations à fournir, les critères de sûreté à analyser ainsi que les limites jugées acceptables qui devront être respectées tout au long de la vie de l'installation pour garantir sa sûreté et la sécurité des travailleurs.

Ces textes réglementaires sont complétés par des référentiels de sûreté qui, bien que n'ayant pas une portée réglementaire, fournissent des prescriptions et des recommandations aux concepteurs, constructeurs et exploitants d'installations nucléaires pour démontrer que leur installation respecte les exigences réglementaires.

Le présent document n'a pas vocation à lister l'ensemble de la réglementation applicable, seuls les référentiels de sûreté concernant et influençant les options de conception et les options de sûreté sont présentés dans cette section. Quelques décrets et lois importants sont rappelés dans la liste des références. Lorsque nécessaire, certains arrêtés ou décrets sont mentionnés tout au long du document.

1.6.1.1 Le guide de sûreté relatif au stockage (ex RFS III.2.f) – un texte de référence

Le Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde publié par l'Autorité de Sûreté Nucléaire le 21 mars 2008[6] définit les objectifs de protection de la santé des personnes et de l'environnement, les principes de sûreté et les bases de conception de l'installation de stockage liées à la sûreté ainsi que la méthode de démonstration de la sûreté du stockage. L'objectif fondamental de sûreté du stockage est défini de la façon suivante :

« *La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques.*

Après la fermeture de l'installation de stockage, 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. »

En conséquence, le milieu géologique est choisi, et l'installation de stockage proposée dans le dossier Argile 2005 et faisant l'objet de ce jalon 2009 est conçue, de telle sorte que sa sûreté après fermeture soit assurée de façon passive afin de protéger les personnes et l'environnement des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

« Les caractéristiques du site retenu, l'implantation de l'installation de stockage, la conception des composants artificiels (colis, composants ouvragés) et la qualité de leur réalisation constituent le fondement de la sûreté du stockage. » Dans ce cadre, on s'assure de leur adéquation à l'objectif fondamental.

[6] Ce guide reprend en grande partie la Règle fondamentale de sûreté n°III.2.f de juin 1991, en la mettant en conformité avec les dispositions des articles L542-1 à L542-14 du code de l'environnement, des articles L1333-1 à L1333-20 du code de la santé publique et des décrets pris pour leur application, à la loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (notamment concernant la réversibilité), ainsi qu'à la convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs

Les dispositions de conception du stockage (architecture, choix des matériaux) présentées dans le chapitre 4 sont conformes au guide de sûreté et répondent aux exigences suivantes :

- un positionnement des liaisons surface-fond adapté aux caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du site afin de contribuer à limiter la migration des radionucléides,
- la sectorisation de l'installation de stockage en modules pouvant être facilement isolés les uns des autres de manière à minimiser les conséquences d'un court-circuit hydraulique d'une partie du système de stockage,
- la réalisation d'alvéoles de stockage selon une architecture permettant de limiter la vitesse de circulation d'eau à proximité des colis, indépendamment du rôle que peuvent jouer les composants ouvragés pour limiter ces circulations,
- la limitation à une valeur inférieure à 100°C de la température maximale atteinte à l'interface entre les colis et les ouvrages de stockage,
- la limitation de la perturbation chimique des ouvrages de stockage.

L'opportunité de retenir ces dispositions pour la conception du système de stockage est étudiée sur la base de l'analyse de leur compatibilité avec une exploitation sûre de l'installation et avec le respect des conditions de réversibilité tel que recommandé par le guide de sûreté.

1.6.1.2 Les autres référentiels de sûreté applicables

Les règles fondamentales et guides de sûreté relatifs aux installations nucléaires de base sont définis majoritairement pour des installations nucléaires de surface autres que les centres de stockage. La spécificité du centre de stockage en profondeur, qui est constitué à la fois d'installations en surface et en profondeur, a amené l'Andra à vérifier la possibilité de transposer ou non chaque référentiel identifié. Cette analyse des règles (ou guides) est faite sur les installations suivantes :

- installations de surface,
- installations de transfert de colis de déchets (puits, descenderie,...),
- installations nucléaires souterraines.

Les analyses de risques présentées dans les chapitres 2, 3 et 4 ont mis en œuvre ces référentiels de sûreté. Une synthèse de cette analyse est présentée dans le Tableau 1.6-1 ci-après :

Tableau 1.6-1 Guides et référentiels de sûreté mis en œuvre

	Intitulé RFS/Guide	**Parties de l'INB**			**Mise en œuvre au stade 2009**
		Surface*	**Transfert (surface-fond)**	**Souterraines**	
Risques d'origine externe liée à des activités humaines	Chute d'avion *(RFS I.1.a 7 octobre 1992)*	Applicable	Transposable	Sans objet	- Pour le Jalon 2009, la prise en compte de ces RFS a permis de définir, sur la zone de transposition de 250 km² élargie, des secteurs présentant des niveaux de risques et des contraintes de dimensionnement similaires. - Transposable pour les structures des installations de transfert émergentes en surface.
	Environnement industriel et voies de communication *(RFS I.1.b 7 octobre 1992)*	Applicable	Transposable	Sans objet	
Risques d'origine externe liée à l'environnement naturel.	Séisme *(RFS 2001-01, Guide séisme 30 mai 2006)*	Applicable	Transposable	Transposable	- Au stade de 2009, identification d'éventuelles sous- zones à l'intérieur de la zone de transposition de 250 km² élargie pouvant entraîner un dimensionnement des locaux à risques. - Dimensionnement au SMS pour toutes les installations ; pas de prise en compte au stade 2009 d'un coefficient d'atténuation avec la profondeur mais sera pris pour la DAC si éléments suffisants. - Prise en compte des avancées de la connaissance du site depuis 2005 (Andra, 2009e).

	Intitulé RFS/Guide	Parties de l'INB			Mise en œuvre au stade 2009
		Surface*	Transfert (surface-fond)	Souterraines	
	Inondation externe *(RFS I.2.e 12 avril 1984)*	Applicable	Sans objet	Sans objet	- Au stade de 2009, identification d'éventuelles sous-zones à l'intérieur de la zone de transposition de 250 km² élargie pouvant entraîner un dimensionnement des locaux à risques. - Installations souterraines et liaisons surface-fond non concernées.
Risques d'origine interne	Criticité *(RFS I.3.c 18 octobre 1984)*	Applicable	Transposable	Transposable	- Au stade de 2009, ce risque est évalué pour toutes les phases de vie au regard des données relatives aux colis de déchets disponibles et de leurs évolutions (inventaire, géométrie…) dans le temps (migration des radionucléides fissiles). Ce risque est évalué pour chaque option de conception envisagée (type de colis de stockage, nature alvéole).
	Incendie *(RFS I.4.a, Guide incendie Mai 2006)*	Applicable	Transposable	Transposable	- Application aux installations de transfert et souterraines sur la base de l'arrêté. - Vérifier la compatibilité des moyens de lutte contre l'incendie en mines ou tunnels par rapport aux installations nucléaires.
Conception	Conception système de ventilation *(RFS II.2 20 décembre 1991)*	Applicable	Transposable	Transposable	- La pertinence d'une ventilation nucléaire dans les installations souterraines sur de grandes longueurs a été analysée, la notion de locaux étant plus difficilement applicable.

Ce tableau amène les principaux commentaires suivants :

La connaissance des risques d'origine externe liés aux activités humaines et à l'environnement naturel est une donnée importante et liée du choix du site d'implantation des installations nucléaires de surface. En effet, le dimensionnement et la mise en œuvre de moyens de protection de l'installation vis-à-vis de ces risques est lié à l'occurrence des agressions pouvant être provoquées par l'environnement humain et naturel. Le dimensionnement des installations de surface et des parties proches de la surface des installations de transfert doit être réalisé vis-à-vis des risques externes liés aux activités humaines (chute d'avion, environnement industriel et voies de communication). Ce dimensionnement est conditionné par la connaissance des données relatives au site d'implantation de ces installations. Dans un premier temps, les risques d'origines externes ont été étudiés en se fondant sur les données disponibles dans la zone de 250 km² afin de déterminer le cas échéant des contraintes de dimensionnement (cf. chapitre 2). Les installations souterraines sont hors du champ d'application des référentiels relatifs à ces risques à l'exception du séisme. En l'absence actuellement de données relative à l'atténuation du séisme avec la profondeur, l'installation souterraine et les équipements sont dimensionnés au séisme pris pour les installations de surface. Pour les installations de transfert et les installations souterraines, les données indispensables concernent la conception de ces ouvrages, la connaissance et la caractérisation mécanique des différentes couches géologiques de la zone d'implantation. Ces ouvrages seront dimensionnés pour résister aux effets d'un Séisme Majoré de Sûreté (SMS). Une vérification du dimensionnement sera réalisée avec un affaiblissement des matériaux des ouvrages représentatif de la durée prévue pour l'exploitation.

Un calcul de dimensionnement prenant en compte un vieillissement des matériaux de protection (affaiblissement des caractéristiques mécaniques) permet de prendre en considération les durées d'exploitation spécifiques à l'Andra (environ 100 ans).

Les moyens de prévention et de lutte incendie dans les installations répondront in fine aux exigences de la réglementation des mines ou tunnels et de la réglementation des installations nucléaires.

La conception des systèmes de ventilation nucléaire est aussi réalisée sur la base de la RFS II.2 et de la norme ISO 17878 pour l'ensemble des installations nucléaires (surface, transfert et souterraines).

D'ici la demande d'autorisation de création, une veille sur l'évolution des règles fondamentales de sûreté et/ou des guides de sûreté sera effectuée afin d'intégrer les dernières évolutions dans la conception. La vérification du respect des exigences de sûreté sera présentée au moment de la Demande d'Autorisation de Création (DAC).

1.6.1.3 Les publications CIPR

L'Andra s'appuie sur les recommandations édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) applicables aux stockages de déchets radioactifs.

Le système de radioprotection recommandé par la CIPR (récemment mis à jour via la publication n° 103 parue en 2007) repose sur l'application des principes de justification et d'optimisation à toute exposition dite contrôlable, qu'il s'agisse d'une situation d'exposition planifiée, d'une situation d'urgence ou d'une situation existante[7].

Dans le cas particulier des expositions planifiées, s'applique également le principe de limitation des doses, efficaces et équivalentes.

Le stockage de déchets radioactifs est un exemple de situation d'exposition planifiée (Publication n° 103 de la CIPR, Glossaire). Selon la publication n° 81 de la CIPR (Recommandations relatives à la protection radiologique appliquées à la gestion des déchets radioactifs à vie longue), un stockage de déchets radioactifs est susceptible d'entraîner des expositions potentielles.

La CIPR estime que l'acceptabilité du stockage repose essentiellement sur le principe d'optimisation sous contrainte, en tenant compte des facteurs économiques et sociaux, et selon une démarche principalement qualitative. Cette optimisation est progressive et se comprend dans le cadre d'une démarche itérative de développement du stockage. Elle doit faire appel aux meilleures technologies disponibles, aux bonnes pratiques de l'ingénierie, et au management de la qualité.

La commission recommande le principe suivant : le niveau de protection des générations futures doit être a minima du même ordre que le niveau de protection actuel. Pour les intervalles de temps considérés, la commission insiste sur le fait que les expositions des groupes critiques sont des indicateurs du niveau de protection atteint et ne doivent pas être considérés comme une prévision de l'impact sanitaire.

Les deux catégories de situations à considérer pour l'application des critères de protection radiologique sont les phénomènes naturels et les intrusions humaines non volontaires. La commission estime la protection radiologique satisfaisante dans la mesure où les contraintes liées aux phénomènes naturels sont respectées, où des mesures sont prises afin de diminuer la probabilité des intrusions humaines.

[7] Les situations d'exposition dans un cadre planifié sont des situations impliquant l'introduction et l'exploitation délibérées de sources émettrices de rayonnements ionisants (CIPR 103) ; elles entraînent des expositions normales ou potentielles. Les situations d'urgence sont des situations qui peuvent se produire fortuitement et nécessiter une action urgente afin d'éviter ou de réduire des conséquences indésirables. Les situations d'exposition existante sont des situations qui existent déjà lorsqu'une décision doit être prise pour les maîtriser.

Encadré 1.6-1 Rappel sur les notions de dose

Le Code de la Santé publique définit les notions de dose, notions utilisées dans le cadre de la protection radiologique, comme rappelé ci-après.

Art. R. 1333-8 :
« *La somme des doses efficaces reçues par toute personne n'appartenant pas aux catégories mentionnées au II du présent article, du fait des activités nucléaires, ne doit pas dépasser 1 mSv par an. Sans préjudice de la limite définie pour les doses efficaces, les limites de dose équivalente admissibles sont fixées, pour le cristallin, à 15 mSv par an et, pour la peau, à 50 mSv par an en valeur moyenne pour toute surface de 1 cm² de peau, quelle que soit la surface exposée.*

Art. R. 1333-10 :
Pour l'application des articles R. 1333-8, R. 1333-9, R. 1333-11 et R. 1333-13, il est procédé à une estimation des doses résultant de l'exposition externe et de l'incorporation de radionucléides, en considérant l'ensemble de la population concernée et les groupes de référence de celle-ci en tous lieux où ils peuvent exister. Pour le calcul des doses efficaces et des doses équivalentes, une décision de l'Autorité de Sûreté Nucléaire, homologuée par les ministres chargés de la santé et du travail, prise après avis de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, définit, compte tenu des effets des radionucléides sur les différents tissus et organes du corps humain :
1° Les méthodes de calcul et les facteurs de pondération qui doivent être utilisés ;
2° Les valeurs de doses efficaces engagées par unité d'activité incorporée, pour chaque radionucléide, ingéré ou inhalé.

Annexe I
<u>Dose efficace (E)</u> : somme des doses équivalentes pondérées délivrées par exposition interne et externe aux différents tissus et organes du corps mentionnés dans l'arrêté mentionné à l'article R. 43-5 du code de la santé publique. Elle est définie par la formule :

$$E = \Sigma w_T . H_T = \Sigma w_T \, \Sigma w_R \, D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ est la moyenne pour l'organe ou le tissu T de la dose absorbée du rayonnement R
w_R est le facteur de pondération pour le rayonnement R
wT est le facteur de pondération pour le tissu ou l'organe T.

Les valeurs appropriées de w_T et w_R sont fixées dans l'arrêté mentionné à l'article R. 43-5 du code de la santé publique.

<u>Dose efficace engagée [E(t)]</u> : somme des doses équivalentes engagées dans les divers tissus ou organes [HT(t)] par suite d'une incorporation, multipliées chacune par le facteur de pondération w_T approprié. t désigne le nombre d'années sur lequel est faite l'intégration.
<u>Dose équivalente (H_T)</u> : dose absorbée par le tissu ou l'organe T, pondérée suivant le type et l'énergie du rayonnement R. Elle est donnée par la formule :

$$H_{T,R} = w_R \, D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ est la moyenne pour l'organe ou le tissu T de la dose absorbée du rayonnement R. w_R est le facteur de pondération pour le rayonnement R

Lorsque le champ de rayonnement comprend des rayonnements de types et d'énergies correspondant à des valeurs différentes de w_R la dose équivalente totale H_T est donnée par la formule :

$$H_T = \Sigma wR \, D_{T,R}$$

<u>Dose équivalente engagée [HT(t)]</u> : intégrale sur le temps (t) du débit de dose équivalente au tissu ou à l'organe T qui sera reçu par un individu à la suite de l'incorporation de matière radioactive. Si la valeur de t n'est pas donnée, elle est implicitement, pour les adultes, de cinquante années. »

1.6.1.4 Les références et pratiques internationales

La démarche de sûreté est cohérente avec les textes relatifs à la sûreté, émis par les organismes internationaux (« requirements » de l'AIEA, brochures de l'OCDE) qui fixent des principes qui permettent le dialogue avec la communauté internationale, en établissant des références communes à tous.

Les développements de la réflexion internationale (« Post-closure safety case for geological repositories » de l'OCDE/AEN) insistent sur la notion de « safety case » (dossier de sûreté) en complément du seul « safety assessment » (évaluation de sûreté). Prolongeant les analyses de risques et évaluations d'impact, conduites dans le but de vérifier une conformité réglementaire, le « safety case » se présente comme une synthèse d'arguments de nature multiple contribuant à asseoir la confiance dans la sûreté du stockage.

Les textes des organismes internationaux (AIEA, AEN, CIPR) constituent ainsi une référence et fixent des principes qui permettent le dialogue avec la communauté internationale. En particulier, l'Andra s'est référée aux textes en vigueur de la CIPR pour les questions relatives à la protection radiologique. La CIPR estime que l'acceptabilité du stockage repose essentiellement sur le principe d'optimisation sous contrainte, en tenant compte des facteurs économiques et sociaux, et selon une démarche principalement qualitative en faisant appel aux meilleures technologies disponibles de l'ingénierie.

Par ailleurs, depuis le premier exercice Européen PAGIS « Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste ; Disposal in Clay formations » (1982-1989), la participation à plusieurs exercices organisés sous l'égide de la communauté européenne (PAMINA, 2006_2009) mais aussi de l'OCDE/AEN (INTESC, EBS, AMIGO...) a permis à l'Andra de se comparer à ses homologues à l'international et de vérifier que les approches étaient similaires.

Le groupe de revue international piloté par l'OCDE/AEN composé de spécialistes indépendants qui a évalué le Dossier 2005 Argile a ainsi conclu « que le programme scientifique était largement en accord avec les pratiques internationales ». Ce groupe de revue a aussi noté que les « approches fondées sur l'utilisation de fonctions de sûreté comme celles choisies par l'Andra, sont en accord avec les meilleures pratiques internationales. La façon dont l'Andra traite les fonctions de sûreté est parmi les plus systématiques de celles utilisées internationalement. ». Il a aussi mentionné que « l'analyse des processus de dissolution de déchets vitrifiés [...] ainsi que les modèles sont particulièrement impressionnants et à l'avant-garde des études internationales ».

1.6.2 Objectifs de protection en phase exploitation vis-à-vis du risque radiologique

On distingue les objectifs de protection retenus pour les situations normales et incidentelles des installations de ceux retenus pour les situations accidentelles.

1.6.2.1 Situation normale

La situation normale correspond au fonctionnement normal de l'installation qui intègre les opérations de maintenance et les indisponibilités programmées. Elle induit potentiellement une exposition interne et externe des personnes, ainsi que des rejets potentiels d'effluents (liquides et/ou gazeux) dans l'environnement. En situation de fonctionnement normal, les moyens de protection radiologique mis en œuvre dans l'installation doivent permettre de limiter l'exposition annuelle individuelle (externe et interne) des personnes et du public en deçà des contraintes de doses fixées par l'Andra. Ces contraintes de doses sont :

- 5 $mSv.an^{-1}$ pour le personnel travaillant en zone nucléaire[8],
- 0,25 $mSv.an^{-1}$ pour le personnel travaillant hors zone nucléaire,
- 0,25 $mSv.an^{-1}$ pour le public.

[8] Les personnes ayant des activités professionnelles localisées en zone réglementée sont considérées comme du personnel travaillant en zone nucléaire. Le classement de ce personnel en catégorie A ou B (Art. R 4453-1 et suivants du code du travail) est basé sur une prévision des doses (efficaces ou équivalentes) annuelles reçues dans une installation en fonctionnement normal.

Ces contraintes représentent une fraction des valeurs de la réglementation française (20 mSv.an^{-1} pour les travailleurs en catégorie A et 1 mSv.an^{-1} pour le public) en cohérence avec les recommandations de la publication n°103 de la CIPR.

Par ailleurs :

- la contamination surfacique des colis et des installations sera limitée aux normes des transports soit 0,4 Bq/cm^2 pour les émetteurs α et 4 Bq/cm^2 pour les émetteurs $\beta\gamma$,
- les rejets gazeux et liquides seront limités,
- le volume et la quantité de déchets nucléaires produits par l'installation sera minimisé autant que techniquement possible,
- le zonage radiologique de l'installation sera établi suivant l'arrêté du 15 mai 2006 dont les valeurs limites d'exposition (cf. Tableau 1.6-2) permettent de délimiter les différentes zones (zone non réglementée et zone réglementée) que cela soit dans les installations surface, liaison surface-fond et installations souterraines.

Tableau 1.6-2 Valeurs limitées d'exposition de la zone non réglementée et des différentes zones réglementées (réf. Arrêté de 15 mai 2006)

	Zone non réglementée	Zones réglementées				
		Zone surveillée	Zone contrôlée simple	Zone contrôlée spécialement réglementée	Zone contrôlée spécialement réglementée	Zone contrôlée interdite
Dose efficace		80 µSv en 1 mois	7,5 µSv en 1 heure	25 µSv en 1 heure	2 mSv en 1 heure	100 mSv en 1 heure
Dose équivalente extrémité			0,2 mSv en 1 heure	0,65 mSv en 1 heure	50 mSv en 1 heure	2,5 Sv en 1 heure
Débit d'équivalent de dose					2 mSv.h^{-1}	100 mSv.h^{-1}

1.6.2.2 Situations incidentelles et accidentelles

Pour les situations de dimensionnement incidentelles, dont la maîtrise est assurée par la mise en œuvre de dispositions techniques, les objectifs de limitation des rejets et plus généralement de l'impact sur le personnel et sur l'environnement seront les mêmes que les objectifs retenus pour les conditions normales.

Pour les situations de dimensionnement accidentelles, l'objectif sera de limiter les rejets gazeux et liquides ainsi que la dose par irradiation à une dose de l'ordre de quelques mSv.

L'objectif poursuivi pour les situations « hors dimensionnement » est de compléter les dispositions prises dans le cadre du dimensionnement pour qu'en cas d'accidents rares mais graves les conséquences soient limitées dans le temps et dans l'espace.

Les situations prises en compte sont définies à partir des situations accidentelles de dimensionnement identifiées en appliquant des défaillances aggravantes supplémentaires indépendantes de l'événement initiateur. Le but de cette démarche est de vérifier qu'il n'y a pas d'effet de falaise pour les scénarios envisagés en établissant que la dégradation des fonctions de sûreté est progressive.

Le Tableau 1.6-3 ci-après synthétise les objectifs de protection en situation normale et incidentelles/accidentelles.

Tableau 1.6-3 Objectifs de protection vis-à-vis des risques radiologiques

	Personnel d'exploitation et de maintenance	**Public et environnement**
Situation normale	Exposition aussi faible que raisonnablement possible, et en tout état de cause : Dose efficace individuelle maximale ≤ 5 mSv / an	Absence de rejets non concertés vers l'environnement et Rejets concertés compatibles avec les autorisations de rejets de l'installation.
DIMENSIONNEMENT		
Situations incidentelles	Exposition aussi faible que raisonnablement possible, et en tout état de cause : Dose efficace individuelle maximale ≤ 5 mSv / an	Rejets non concertés admis si la dose efficace individuelle maximale reste inférieure aux valeurs données par la réglementation.
Situations accidentelles	Démarche de limitation des doses des travailleurs. Prise en compte des contraintes liées à la gestion des situations post-accidentelles.	Exposition en dose efficace (calcul intégré sur 50 ans après l'accident) < 10 mSv. Absence de nécessité, immédiate ou différée, de mesures de protection du public (confinement, évacuation).
HORS DIMENSIONNEMENT		
Situations accidentelles	Pas d'effet de falaise	
		Mesures de protection du public limitées dans le temps et l'espace vis-à-vis des conséquences éventuelles.

1.6.3 Objectif de protection en phase après fermeture vis à vis du risque radiologique

La CIPR 81 recommande l'utilisation de contraintes de dose ou de risque pour les deux catégories de situations à considérer, a savoir les phénomènes naturels et les intrusions humaines non volontaires :

- phénomènes naturels : contrainte de dose de 0,3 mSv/an pour les pratiques[9] ou contrainte de risque de 10^{-5}/an pour les expositions potentielles[10],
- intrusion humaine non volontaire : les conséquences de scénarios génériques devront être étudiées :
  - ✓ si les conséquences de l'intrusion restent inférieures à 10 mSv/an, une intervention n'est pas justifiée,
  - ✓ si les conséquences de l'intrusion sont supérieures à 100 mSv/an ou aux seuils d'apparition d'effets déterministes pour les organes critiques, des efforts raisonnables pour réduire la probabilité d'occurrence de l'intrusion et ses conséquences doivent être menés.

L'Andra retient la notion de contrainte de dose et non de contrainte de risque comme indicateur de l'acceptabilité du stockage. Néanmoins, et conformément à la publication n° 103 de la CIPR, l'optimisation doit reposer sur d'autres paramètres, tels que la robustesse des barrières assurant le confinement et l'isolement des déchets.

Ainsi, l'Andra, pour le long terme, retient comme principal indicateur de protection la dose efficace engagée, à l'exutoire.

Le respect d'une dose de 0,25 mSv/an au plus en situation normale fixée par le guide de sûreté (ASN, 2008) est retenu par l'Andra, valeur du même ordre de grandeur que la contrainte de dose de 0,3 mSv/an fixée par la CIPR 81.

Pour les situations considérées comme altérées, conformément au guide de sûreté (ASN, 2008), les situations altérées retenues pour la conception du stockage sont maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

[9] La CIPR considère les pratiques, ou expositions planifiées, comme des situations courantes impliquant les opérations planifiées relatives à une source telles que le démantèlement ou la gestion des déchets radioactifs.
[10] Expositions pour lesquelles il existe une probabilité d'apparition.

L'impact calculé s'apprécie en fonction de la vraisemblance de la situation, du caractère chronique ou ponctuel des expositions, du degré de pessimisme des hypothèses de calcul et au regard de l'analyse des efforts faits par le concepteur du stockage pour que les expositions individuelles soient aussi faibles que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

L'évaluation d'impact présente des difficultés spécifiques quand elle est pratiquée sur plus d'un million d'années. À cette échelle, il est illusoire de prétendre disposer d'une évaluation des modes de vie des êtres qui peupleront le secteur étudié. Les conditions d'environnement, en particulier climatiques, seront, elles aussi, soumises à des variations importantes, qu'il est possible de prédire quant à leurs caractéristiques principales, mais dont il est difficile de rendre compte de manière précise dans un contexte local. La définition du groupe critique est nécessairement en partie conventionnelle, les habitudes de vie des populations étant difficilement prévisibles au-delà de quelques générations.

La dose calculée à long terme est un indicateur de sûreté enveloppe de l'impact sur une population théorique la plus exposée, et non une prédiction de ce dernier. La dose n'est pas un indicateur suffisant, aussi d'autres indicateurs sont utilisés, pour vérifier les performances intrinsèques du stockage, sans nécessiter d'hypothèses sur l'environnement de surface et la biosphère par définition variables à très long terme. Ils sont présentés dans la section 1.6.3. Ces indicateurs permettent de comparer des situations différentes ou des dispositions de conception différentes, pour voir laquelle est la plus favorable au regard de la limitation des transferts de radionucléides, mais ils ne peuvent cependant pas être comparés à des seuils. Le recours à d'autres arguments de nature qualitative (expérimentation, retour d'expérience, analogues..) est aussi privilégié.

1.6.4 Objectif de protection vis-à-vis des toxiques chimiques

La protection des personnes et de l'environnement se comprend avant tout comme une protection contre le risque spécifique dû aux déchets radioactifs, à savoir la radioactivité et ses effets induits. La protection contre d'autres atteintes dues aux déchets, notamment le risque chimique, n'est pas pour autant négligeable, mais ne constitue pas un aspect spécifique des déchets considérés. Pour ce qui est du risque chimique, du fait que les problématiques sont de même nature (empêcher et retarder le transfert d'éléments chimiques jusqu'à l'environnement), les solutions apportées au problème posé par les éléments radioactifs couvrent en règle générale une grande partie des difficultés posées par les toxiques chimiques. L'Andra étudie l'impact chimique du stockage de manière générale et se concentre, pour les évaluations quantitatives, sur quelques toxiques sélectionnés de manière à couvrir ceux qui sont les plus pénalisants.

Par cohérence avec la démarche d'évaluation des risques sanitaires associés aux substances chimiques définie pour les études d'impact des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), l'Andra a choisi d'utiliser l'approche mettant en œuvre les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) telle que décrite par l'INERIS pour l'évaluation des effets sur la santé en exprimant l'impact chimique en terme d'Excès de risque individuel (ERI[11]) pour les éléments à effets cancérigènes, et de Quotient de Danger (QD[12]) pour les éléments à effets non cancérigènes. Cette approche s'applique aux scénarios d'exposition chronique (sur plusieurs années). Les objectifs d'acceptabilité du risque sanitaire, définis dans la circulaire du 8 février 2007 relative aux sites et sols pollués, sont les suivants :

- pour les espèces non cancérigènes : QD < 1,
- pour les espèces cancérigènes : ERI < 10^{-5} (soit 1 cas supplémentaire pour 100 000 individus exposés).

[11] ERI : Excès du Risque Individuel. Traduit la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu a de développer un cancer associé à la substance pendant sa vie du fait de l'exposition considérée. L'ERI correspond au produit du niveau d'exposition à la substance chimique (concentration dans l'eau, concentration dans l'air, dose journalière d'exposition dans le cas des transferts dans la biosphère) par la valeur toxicologique de référence caractéristique de l'effet considéré et de la voie d'atteinte considérée.

[12] QD : Quotient de Danger. Il correspond au rapport du niveau d'exposition à la substance chimique (concentration dans l'eau, dans l'air ou dose journalière d'exposition dans le cas des transferts dans la biosphère) sur la valeur toxicologique de référence (valeur en dessous de laquelle les effets systémiques ne se manifestent pas). L'INERIS utilise la terminologie IR (Indice de risque) à la place de la terminologie QD.

Ces critères sont définis pour des expositions chroniques (plusieurs années), en particulier les scénarios de transfert par l'eau en situation d'évolution normale (SEN).

Compte tenu des incertitudes qui affectent l'évaluation des paramètres QD et ERI pour certaines substances, et afin de prendre en compte leur présence éventuelle dans le milieu environnant, d'autres indicateurs pourront être utilisés en référence (limites réglementaires, limites de potabilité des eaux, référence aux teneurs naturelles).

En situation d'évolution aléatoire de faible probabilité d'occurrence, l'Andra analyse au cas par cas les impacts en retenant en référence les seuils d'acceptabilité correspondant à une situation normale, mais en considérant qu'un dépassement peut être acceptable selon la vraisemblance du scénario.

1.6.5 Objectifs de protection vis-à-vis des gaz de radiolyse

Certains colis de déchets MAVL (principalement les déchets dans une matrice bitumineuse) émettent des gaz, depuis leur arrivée dans les installations de surface jusqu'à leur stockage en alvéole souterraine. Ces gaz ont pour origine un phénomène de radiolyse qui est lié à l'effet des rayonnements ionisants sur les produits hydrogénés présents dans les colis (matières organiques, eau de la matrice de conditionnement).

Ces gaz de radiolyse sont majoritairement l'hydrogène (plus de 90 % du dégagement gazeux) et, à un moindre degré, le méthane. L'émission de ces gaz peut être à l'origine d'une explosion, si leurs concentrations dépassent leur limite inférieure d'explosivité (LIE). Les valeurs retenues pour les concentrations en hydrogène sont issues de la circulaire du 9 mai 1985 concernant l'aération et l'assainissement des lieux de travail. Lorsque des substances susceptibles de former un mélange explosif sont des gaz ou des vapeurs inflammables, leur concentration doit être maintenue à la plus faible valeur possible et rester inférieure à (cf. article R232-1-7 du Code du Travail) :

- 25 % de la LIE dans l'ensemble des installations (1 % de H_2),
- 10 % de la LIE si des personnes travaillent dans l'atmosphère (0,4 % de H_2).

1.6.6 Objectifs de protection vis-à-vis du risque de criticité

Le risque de criticité est lié à la présence de matières fissiles dans les déchets conditionnés dans les colis qui seront accueillis dans les installations de stockage.

Il convient de retenir que les installations de surface du stockage peuvent réceptionner à la fois des colis de déchets primaires et des colis de stockage, puis les entreposer compte tenu des contraintes d'exploitation du stockage. Ensuite, les colis de stockage sont transférés vers les installations souterraines du stockage jusqu'aux alvéoles de stockage (les principes de fonctionnement et l'architecture générale sont présentés dans les chapitres ci-après). Ainsi, l'Andra applique les principes présentés dans la règle fondamentale de sûreté I.3.c tant dans la conception des installations de surface et souterraines que pour l'exploitation des installations du stockage.

Ces principes généraux sont les suivants :

- un accident de criticité ne doit en aucun cas découler d'une seule anomalie : défaillance d'un composant, d'une fonction, erreur humaine (non-respect d'une consigne par exemple), situation accidentelle (incendie par exemple)…,
- si un accident de criticité peut découler de l'apparition simultanée de deux anomalies, il sera alors démontré que : les deux anomalies sont rigoureusement indépendantes, la probabilité d'occurrence de chacune des deux anomalies est suffisamment faible.

La démonstration de la maîtrise du risque de criticité est réalisée pour l'ensemble des types de colis de déchets MA-HAVL qui seront accueillis sur les installations du stockage :

- en fonction des modes de contrôles de la criticité qui seront identifiés. Sur la base du modèle d'inventaire (MID), chaque famille de colis de déchets peut être associée à un milieu fissile de référence et à une géométrie interne de conteneur,

- en fonction de leurs localisations dans les installations de surface, dans les ouvrages de transfert (liaisons surface – fond et galeries souterraines) et dans les alvéoles de stockage,
- en fonction des différentes opérations de manutention qui seront réalisées (déchargement des emballages de transport, opérations de transfert, descente en hotte, pré-empilage des colis de stockage,…),
- pour les deux phases de la vie de l'installation de stockage MA-HAVL : la phase d'exploitation réversibilité et la phase après fermeture.

Pour ce qui concerne la phase après fermeture du stockage, l'évaluation du risque de criticité doit, par rapport à une installation nucléaire « classique », tenir compte de l'évolution dans le temps de la matière nucléaire, en termes d'inventaire et de localisation de la matière fissile, et de son environnement proche (cf. chapitre 4).

Le Tableau 1.6-4 ci-dessous résume les différents périmètres des analyses de criticité à faire afin de justifier de la maîtrise du risque de criticité sur les installations de stockage à tout moment à partir de sa mise en exploitation.

Tableau 1.6-4 Périmètres des analyses de criticité

		t_0 → → temps → → ∞	
		Exploitation	Long terme
Localisation du colis	dans les installations de surface	☑	sans objet
	dans les installations souterraines	☑	☑

Il faut souligner que bien que plusieurs périmètres pour l'analyse de criticité soient considérés, puisque les exigences issues de l'une d'entre elle contraindront les autres, une cohérence d'ensemble est assurée. Ainsi, la conception des installations de stockage (les architectures des installations de surface et souterraines, les colis de stockage…) prend en compte les exigences les plus contraignantes mises en exergue lors de l'analyse d'un des périmètres précité. Par exemple, la limite de masse admissible par colis primaire dans un colis de stockage est contrainte par la limite de masse la plus basse qui sera déterminée pour les installations de surface et les installations souterraines en exploitation ou après fermeture.

Par ailleurs, l'Andra favorise à la conception du stockage les dispositions constructives de maîtrise du risque de criticité par rapport à des consignes d'exploitation afin de réduire le risque lié au facteur humain. Ainsi, la conception des colis de stockage et des installations de surface et souterraines participe à la robustesse de la démonstration de la maîtrise du risque de criticité.

Les critères d'admissibilité retenus à ce stade des études pour la conception du stockage sont résumés dans le tableau ci-après (Tableau 1.6-5).

Tableau 1.6-5 Critères d'admissibilité proposés à ce stade des études pour les différentes situations

	Situation normale	Situations incidentelles
Phase d'exploitation et de réversibilité	$k_{eff} + 3\sigma \leq 0,95$	$k_{eff} + 3\sigma \leq 0,97$
Phase après-fermeture	$k_{eff} + 3\sigma \leq 1$ ou 0,98	

A cet égard, pour l'évaluation du risque de criticité qui sera présentée dans les dossiers associés à la DAC en 2014, l'Andra prendra en compte les résultats expérimentaux obtenus grâce au programme de recherche MIRTE (Matériaux Interaction Réflexion, Toutes Epaisseurs). Ces résultats permettront de mieux justifier la qualification des codes de calculs utilisés au regard des modélisations retenues pour les calculs de criticité et d'affiner si nécessaire les marges de sûreté.

Enfin, pour ce qui concerne la phase d'exploitation, les installations du stockage sont décomposées en unités fonctionnelles (ou unités de criticité) qui sont caractérisées par des modes de contrôles (masse, géométrie…) associés à des limites. Ainsi, pour le mode de contrôle par la masse, la caractérisation des

colis primaires est effectuée par les producteurs qui s'assurent de leur conformité avec leurs spécifications de production. Des contrôles seront réalisés par l'Andra afin de vérifier, par sondage, le respect des spécifications d'acceptation du stockage par les producteurs et la fiabilité des déclarations de la masse de matières fissiles. Ainsi, chaque colis primaire a fait l'objet dans l'installation expéditrice de contrôles ou de mesures qualifiées afin de garantir notamment le respect des masses de matières fissiles par colis primaire au regard de la spécification d'acceptation du stockage. L'Andra gère donc chaque unité de criticité ayant un mode de contrôle par la masse sur la base de la déclaration du producteur, de l'identification et du suivi de chaque colis primaire et colis de stockage.

1.6.7 Le modèle d'inventaire des colis de déchets

Conformément au « Guide de sûreté relatif au stockage en formation géologique profonde publié par l'ASN en 2008 » (ex RFS III.2.f), les colis participent à la sûreté de l'installation de stockage en phase d'exploitation, ainsi qu'autant que nécessaire à la sûreté du stockage après fermeture de l'installation. De ce fait, ils doivent être caractérisés et leur qualité garantie. Les recherches qui ont débouché sur le dossier 2005 HAVL argile ont permis de préciser les paramètres essentiels pour la sûreté et les principales incertitudes résiduelles, en distinguant plusieurs catégories de colis de déchets.

Une particularité fondamentale des déchets destinés au stockage « géologique profond » est la coexistence, avant même que le concept de stockage ne soit défini, de trois niveaux d'avancement du processus de création des colis primaires de déchets :

- des déchets anciens déjà conditionnés, auxquels la définition du concept de stockage doit s'adapter, sous réserve d'une maîtrise de l'évolution à long terme permettant le respect des exigences de sûreté,
- des déchets existants en vrac, dont le conditionnement peut être défini en même temps que le concept de stockage, sous réserve d'être conditionnés au plus tard en 2030,
- des déchets non encore produits à ce jour pour lesquels les volumes, caractéristiques et processus de production, traitement et conditionnement peuvent évoluer, sous certaines limites.

Pour dimensionner les installations souterraines de stockage, l'Andra a élaboré un modèle d'inventaire de dimensionnement (MID). Conformément au décret du 16 avril 2008, le MID a été mis à jour en 2009 (Andra, 2009d).

Le MID ajoute des marges aux prévisions des producteurs de déchets pour tenir compte des incertitudes sur les scénarios de production électronucléaire et de gestion des déchets, sur les caractéristiques des colis et sur leur inventaire. Il prend aussi en compte les incertitudes sur l'acceptabilité de certains déchets dans les stockages actuels ou futurs en surface ou à faible profondeur. Le MID définit ainsi des données d'entrée prudentes sur les colis primaires pour le dimensionnement du futur stockage en formation géologique profonde.

Le MID est organisé en « colis-types ». Il s'agit d'une structure arborescente organisant les diverses familles de colis primaires de déchets en fonction de leurs caractéristiques les plus importantes pour la conception du stockage. Il apporte les éléments suivants :

- description représentative des déchets HA-MAVL et des combustibles existants et prévisionnels suivant différents scénarios,
- hypothèses de conditionnement des déchets anciens non conditionnés et des déchets futurs,
- structuration de l'inventaire, initialement décrit par une centaine de familles de déchets conditionnés ou non, en colis types déclinés suivant une arborescence allant de un à trois niveaux,
- description détaillée des caractéristiques techniques des colis types (géométries, caractéristiques radiologiques et chimiques, caractéristiques thermiques, débits de dose, caractéristiques mécaniques, …),
- données quantitatives de production avec chroniques (début-fin de production, flux).

La description des colis-types se fonde sur des « dossiers de connaissances » établis par les producteurs des déchets pour les différentes familles de déchets, conditionnés ou non. A ce stade du projet, la fourniture des dossiers de connaissances par les producteurs et leur analyse par l'Andra est une donnée d'entrée mais ne préjuge pas l'acceptation des colis en objet dans le futur stockage.

Nota : Des projets de spécifications d'acceptation des colis en stockage seront établis et joints au dossier de demande d'autorisation de création. Il existe un lien entre le niveau de connaissance, les exigences spécifiées et les paramètres utilisés dans l'analyse de sûreté du stockage. Ces spécifications résultent des analyses de sûreté sous-tendant le rapport de sûreté joint à la demande d'autorisation de création, puis à la demande de mise en service. Elles évolueront au gré du retour d'expérience tout au long de la vie de l'installation. Une fois le stockage mis en service, l'acceptation d'un colis par l'Andra se fondera sur le respect de ces exigences spécifiées, à l'instar des centres de surface.

1.6.7.1 Les déchets de haute activité (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. La haute activité « beta - gamma » des déchets HA vitrifiés génère un dégagement thermique important, qui décroît dans le temps, principalement avec la décroissance radioactive de produits de fission de période d'environ trente ans (césium 137, strontium 90).

Les combustibles non traités inclus dans le modèle d'inventaire comprennent en particulier des combustibles résiduels issus de réacteurs « UNGG », des combustibles issus d'activités de recherche, des combustibles de la propulsion nucléaire. Quelques sources scellées usagées au strontium 90 sont également identifiées comme susceptibles d'être stockées en formation géologique profonde avec les déchets HA.

Les combustibles usés issus de la production électronucléaire sont actuellement considérés comme des matières, qui sont traitées pour réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs. Conformément au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, des études sont menées à titre conservatoire sur le stockage direct des combustibles usés. Ces études visent en particulier à poursuivre les recherches sur le comportement à long terme des assemblages de combustibles usés et à s'assurer de l'absence de caractère rédhibitoire de l'architecture qui sera proposée dans le dossier de demande d'autorisation de création pour le stockage éventuel de combustibles usés.

Figure 1.6-1 Illustration de colis HA

Le Tableau 1.6-6 présente les différents colis types qui seront reçus par les installations de stockage ainsi que l'inventaire numérique des colis sur la base du scénario de base défini dans le MID.

Pour ce qui concerne les déchets vitrifiés, les colis types retenus sont :

Tableau 1.6-6 Synthèse des colis types HAVL du modèle d'inventaire 2009

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1et IN	Niv 2	Niv 3			
C	C0	C0.1 F1-5-01	Conteneur en acier contenant des déchets vitrifiés PIVER	180	T_{2015}= 1,6.10^{14} Bq T_{2025}= 1,3.10^{14} Bq T_{2125}= 1,3.10^{13} Bq
		C0.2 F1-3-02	CSD-U : verre UMo	1000	T_{2015}= 3,2.10^{14} Bq T_{2025}= 2,6.10^{14} Bq T_{2125}= 2,7.10^{13} Bq
		C0.3 F1-4-01	Conteneur en acier contenant des déchets vitrifiés AVM	3250	T_{2015}= 1,1.10^{15} Bq T_{2025}= 9,2.10^{14} Bq T_{2125}= 9,9.10^{13} Bq
		C0.4 F2-4-13	Conteneur en acier contenant des déchets vitrifiés d'Atalante	5	T_{2015}= 5.10^{14} Bq T_{2025}= 3,2.10^{14} Bq T_{2125}= 4,2.10E^{13} Bq
C ou famille F1-3-01*	C1	-	CSD-V : verre UOX R7/T7 produits suivant la spécification 300 AQ 16	7710	T_{2015}= 1,1.10^{16} Bq T_{2025}= 7,8.10^{15} Bq T_{2125}= 9,9.10^{14} Bq
	C5	-	CSD-V : verre UOX R7/T7 (dont les verres à teneur augmentée en actinides produits suivant la spécification 300 AQ 60)	14870	T_{2015}= 1,3E^{16} Bq T_{2025}= 9,3.10^{15} Bq T_{2125}= 1,2.10^{15} Bq
	C6	-	CSD-V : verre UOX/URE/MOX	16900	T_{2015}= 9,6.10^{15} Bq T_{2025}= 7,1.10^{15} Bq T_{2125}= 9,9.10^{14} Bq
	C7	-	CSD-V : verre de vidange R7/T7	210	en cours de consolidation
	C8	-	CSD-V : verre issus du traitement de combustibles REP et RNR (Superphénix)	1120	en cours de consolidation
	C9	-	CSD-V : verre de calcinât	50	en cours de consolidation

* la famille F1-3-01 de l'inventaire national (Andra, 2009j) ne prend pas en compte actuellement les verres UOX/URE/MOX et REP/RNR car ils seront produits après 2030.

1.6.7.2 Les combustibles issus de réacteurs de recherche

Pour ce qui concerne les combustibles usés, les colis types retenus sont :

Tableau 1.6-7 Synthèse des colis types combustibles usés du modèle d'inventaire 2009

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1et IN	Niv 2	Niv 3			
CU3	CU3.1	CU3.1.1	Combustibles usés à base d'uranium	250	T_{2015}= 4,6.10^{13} Bq T_{2025}= 2,4.10^{13} Bq T_{2125}= 2,8.10^{12} Bq
	famille F1-5-02	CU3.1.2	Combustibles usés EL4	2670	T_{2015}= 4,6.10^{13} Bq T_{2025}= 3,6.10^{13} Bq T_{2125}= 4,4.10^{12} Bq
	CU3.1	CU3.1.3	Combustibles usés Osiris	140	T_{2015}= 3,1.10^{14} Bq T_{2025}= 2,3.10^{14} Bq T_{2125}= 3,0.10^{13} Bq
		CU3.1.4	Combustibles expérimentaux usés	210	T_{2015}= 5.10^{14} Bq T_{2025}= 3,8.10^{14} Bq T_{2125}= 4,9.10^{13} Bq
	CU3.4*	-	Combustibles usés de la propulsion nucléaire	2190	en cours de consolidation

* les combustibles militaires usés ne rentrent pas dans le périmètre de l'inventaire national, puisque ces combustibles sont considérés comme des matières radioactives.

1.6.7.3 Les déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL)

Les déchets MAVL se caractérisent par une activité beta-gamma 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 conditionnements. Certains colis de déchets MAVL contiennent des matières organiques ou de l'eau (dans le cas d'un conditionnement recourant au ciment), qui génèrent de l'hydrogène gazeux sous l'effet de la radiolyse. Ces colis émettent aussi des radionucléides gazeux.

Les déchets MAVL conditionnés sur le site de La Hague comprennent des déchets directement issus des combustibles usés traités dans les usines du site. Il s'agit des éléments de structure des assemblages combustibles (gaines des crayons combustibles, pièces (embouts) situées aux deux extrémités de l'assemblage combustible et autres accessoires tels que les grilles). Ces déchets de structure sont actuellement compactés et conditionnés dans des conteneurs standards (« CSD-C »[13]), dont la géométrie externe est pratiquement identique à celle des déchets HA vitrifiés sur le site. La puissance thermique des « CSD-C » contenant des déchets de structure est de l'ordre d'une trentaine de watts. Elle est due essentiellement au cobalt 60. Elle diminue dans le temps avec la décroissance radioactive rapide de ce radionucléide, dont la période est de 5,3 années.

D'autres types de déchets MAVL sont liés à l'usage et au démantèlement des installations, constitués des déchets de maintenance et de démontage des équipements (appelés communément « déchets technologiques ») et des déchets de traitement des eaux de piscines et des résidus de traitement

[13] Conteneur standard de déchets compactés

chimique des effluents radioactifs. Ces différentes familles sont identifiées dans le modèle d'inventaire et font l'objet de conditionnements spécifiques.

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). Les résidus d'effluents liquides bitumés dans la station de traitement des effluents de Marcoule, démarrée en 1966, constituent une part significative du modèle d'inventaire. Le modèle d'inventaire inclut également les déchets MAVL conditionnés sur les sites de Cadarache et de Valduc ainsi que les déchets d'exploitation et de déconstruction des réacteurs électronucléaires dont le conditionnement est prévu sur le site de Bugey.

Figure 1.6-2 Illustration de colis MAVL (Fût EIP et Conteneur 870 l du CEA)

Pour ce qui concerne les déchets bitumés, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B2	B2.2 F2-4-04 +F9-4-01	-	Fûts en acier issus du reconditionnement de fûts d'enrobés bitumineux STEL	11200	t_{2015}[14]= 1,5.10^{12} Bq t_{2025}[15]= 1,2.10^{11} Bq t_{2125}[16]= 1,5.10^{11} Bq
	B2.3 F2-3-04 F2-4-03	-	Fûts en acier contenant des enrobés bitumineux STE3 et STEL	15780	t_{2o15}= 1,6.10^{12} Bq t_{2025}= 8,3.10^{11} Bq t_{2125}= 8,5.10^{10} Bq
	B2.4 F2-3-05	-	Fûts en acier contenant des enrobés bitumineux STE2 (silo 550-14 en partie)	340	en cours de consolidation
	B2.5 F2-4-04 +F9-4-01	-	Fûts en acier contenant des enrobés bitumineux STEL	46690	t_{2015}= 1,5.10^{12} Bq t_{2025}= 1,2.10^{12} Bq t_{2125}= 1,5.10^{11} Bq
	B2.6	-	Fûts en acier contenant des enrobés bitumineux STE3 contenant des déchets technologiques et fûts instrumentés	90	en cours de consolidation

[14] 2015 correspond à la date de la DAC
[15] 2025 correspond à la date de mise en service du stockage
[16] 2125 correspond à la date de 100 and après la mise en service du premier colis

Pour ce qui concerne les déchets technologiques et divers, cimentés ou compactés, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B3	B3.1	B3.1.1 F2-5-06	Conteneurs métalliques issus du reconditionnement de conteneurs en béton « 1000 litres »	90	en cours de consolidation
		B3.1.2 F2-3-07 F2-3-08	Conteneur amiante-ciment (CAC) ou en béton (CBF-C'2) contenant des déchets technologique divers	9520	t_{2015}= 9,9.10^{12} Bq t_{2025}= 6,5.10^{12} Bq t_{2125}= 7,0.10^{11} Bq
		B3.1.3 F2-5-06	Conteneurs métalliques issus du reconditionnement de conteneurs en béton « 1800 litres »	180	en cours de consolidation
	B3.2	B3.2.3 F2-5-02	Conteneur de 500 litres en béton contenant des fûts de concentrats d'évaporation cimentées	470	en cours de consolidation
		B3.2.4 F2-5-02	Conteneur de 500 litres en béton contenant des fûts de boues de filtration cimentés	3140	t_{2015}= 1,1.10^{11} Bq t_{2025}= 1,0.10^{11} Bq t_{2125}= 6,9.10^{10} Bq
	B3.3	B3.3.2 F2-4-10	Fûts en acier contenant des déchets technologiques métalliques et organiques	3440	t_{2015}= 1,6.10^{12} Bq t_{2025}= 1,1.10^{12} Bq t_{2125}= 2,2.10^{11} Bq
		B3.3.5 F2-3-02 F2-3-03	CSD-C contenant des déchets technologiques métalliques et organiques	500	en cours de consolidation
		B3.3.6 F2-4-05	Conteneurs en acier contenant des déchets d'exploitation de l'AVM	190	t_{2015}= 1,3.10^{11} Bq t_{2025}= 1,0.10^{11} Bq t_{2125}= 1,1.10^{10} Bq
		B3.3.7 F2-4-11	Fûts en acier contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique	1050	t_{2015}= 9,8.10^{12} Bq t_{2025}= 7,6.10^{12} Bq t_{2125}= 1,1.10^{12} Bq
		B3.3.8 F2-3-13	Fûts en acier contenant des déchets divers cimentés (fines et résines, déchets pulvérulents, déchets de fond de silo)	680	en cours de consolidation
		B3.3.9 F3-4-08	Fûts de relargage STEL avec complément de bitume	350	en cours de consolidation
	B3.4	B3.4.1 F2-5-02	Fûts en acier contenant des boues de filtration cimentées	2240	t_{2015}= 2,2.10^{12} Bq t_{2025}= 1,4.10^{12} Bq t_{2125}= 1,5.10^{11} Bq
B3	B3.4	B3.4.2 F2-6-02	Fûts en acier contenant des boues de filtration, des concentrats ou un mélange boues-concentrats cimentés (Valduc)	410	t_{2015}= 2,9.10^{11} Bq t_{2025}= 2,2.10^{11} Bq t_{2125}= 9,4.10^{10} Bq

Pour ce qui concerne les déchets de structure cimentés, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B4	B4.1 F2-3-01	-	Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés	1520	t_{2015}= 6,5.10^{13} Bq t_{2025}= 5,4.10^{13} Bq t_{2125}= 2,0.10^{13} Bq
	B4.2 F2-4-09	-	Fûts en acier contenant des déchets de structures magnésiens cimentés	9330	t_{2015}= 9,3.10^{12} Bq t_{2025}= 7,6.10^{12} Bq t_{2125}= 1,1.10^{12} Bq
	B4.3 F2-4-07	-	Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés	860	t_{2015}= 4,7.10^{12} Bq t_{2025}= 3,9.10^{12} Bq t_{2125}= 1,8.10^{12} Bq
	B4.4 F2-4-14	-	Conteneurs en acier contenant des déchets de structures et déchets divers métalliques issus des traitements des combustibles irradiés à l'APM (atelier pilote de Marcoule)	190	en cours de consolidation

Pour ce qui concerne les déchets de structure compactés, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B5 F2-3-03	B5.2 F2-3-02	B5.2.1	CSD-C produits suivant la spécification 300AQ 055	9000	t_{2015} = 1,6.10^{14} Bq t_{2025}= 8,2.10^{13} Bq t_{2125}= 1,5.10^{13} Bq
		B5.2.2	CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP UOx	16260	en cours de consolidation
		B5.2.3	CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP UOX/URE/MOX	15990	en cours de consolidation
	B5.3 F2-3-02	-	CSD-C contenant des déchets de structure sans déchet technologique (silo HAO)	2490	t_{2015} = 4,5.10^{13} Bq t_{2025}= 3,8.10^{13} Bq t_{2125}= 1,3.10^{13} Bq
	B5.4 F2-3-03	-	CSD-C contenant des déchets de structure magnésiens, sans déchet technologique (silos 115 et 130)	400	en cours de consolidation
B5	B5.5*	-	CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP et RNR (Superphénix)	1390	en cours de consolidation

* les CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP et RNR (Superphénix) n'ont pas de correspondance dans l'inventaire national (IN 2009) car ils seront produits après 2030.

Pour ce qui concerne les sources scellées usagées et les déchets au radium et/ou à l'américium, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B7	B7.1 F2-9-01	-	Conteneurs en acier issus du reconditionnement de conteneurs dits « blocs sources »	40	t_{2015}= 1,9.10^{11} Bq en cours de consolidation
B8	B8.2 F6-9-02 F6-9-04	-	Conteneurs en acier non allié de 870 litres contenant des têtes de paratonnerres au radium ou à l'américium ou mixte radium/américium	250	t_{2015}= 2,5.10^{10} Bq t_{2025}= 5,6.10^{9} Bq t_{2125}= 5,8.10^{9} Bq

Pour ce qui concerne les déchets activés des réacteurs, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B9	B9.1 F2-2-03	B9.1.1	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur REP300- Chooz A	950	t_{2015}= 8,4.10^{13} Bq t_{2025}= 7,6.10^{13} Bq t_{2125}= 3,8.10^{13} Bq
		B9.1.2	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur EL - Brennilis		t_{2015}= 3,1.10^{13} Bq t_{2025}= 2,8.10^{13} Bq t_{2125}= 1,4.10^{13} Bq
		B9.1.3	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur UNGG – Chinon A		t_{2015}= 1,2.10^{15} Bq t_{2025}= 1,1.10^{15} Bq t_{2125}= 5,7.10^{14} Bq
		B9.1.4	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur UNGG – St Laurent		en cours de consolidation
		B9.1.5	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur UNGG – Bugey 1		t_{2015}= 1,6.10^{14} Bq t_{2025}= 1,2.10^{14} Bq t_{2125}= 5,8.10^{13} Bq
		B9.1.6 F2-2-03 F2-2-02	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur RNR Superphénix (Creys Malville)		t_{2015}= 2,2.10^{13} Bq t_{2025}=9,7.10^{12} Bq t_{2125}= 2,6.10^{12} Bq
	B9.2 F2-2-03	-	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés d'exploitation (DAE) des réacteurs REP (parc actuel + EPR)	1070	en cours de consolidation

Pour ce qui concerne les déchets technologiques et divers cimentés ou compactés en colis 500 Litres moyennement irradiants, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B10 F2-5-05	B10.1	-	Conteneurs 500 litres en acier contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	430	en cours de consolidation
	B10.2	-	Conteneurs 500 litres en acier contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	2645	en cours de consolidation
	B10.3	-	Conteneurs 500 litres en acier contenant des déchets divers compactables bloqués dans un liant hydraulique	1500	en cours de consolidation

Pour ce qui concerne les déchets technologiques et divers, cimentés ou compactés en colis 870 Litres faiblement irradiants, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B11 F2-5-04	B11.1	-	Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	2190	en cours de consolidation
	B11.2	-	Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	5660	en cours de consolidation
	B11.3	-	Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets divers cimentés issus de la reprise des fûts PEGASE	660	t_{2015}= 4,8.10^{12} Bq en cours de consolidation
	B11.4	-	Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique (déchets alpha de Marcoule)	480	en cours de consolidation
	B11.5	-	Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique (Valduc) Plusieurs sous familles de colis peuvent être distinguées. Elles présentent des activités nominales variables. Les valeurs présentées dans la colonne « activité nominale par colis » sont celles de la sous famille de colis la plus active.	460	t_{2015}= 2,1.10^{12} Bq t_{2025}=1,5.10^{12} Bq t_{2125}= 5,1.10^{11} Bq
	B11.6	-	Conteneurs 870 litres en acier issus du reconditionnement des fûts de 700 litres de concentrats	40	en cours de consolidation
	B11.7	-	Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets technologiques et des sources scellées usagées bloqués dans un liant hydraulique	?	en cours de consolidation

Pour ce qui concerne les effluents de rinçage ou de recyclage vitrifiés, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B12	B12.1 F2-3-11	-	CSD-B en acier contenant des effluents radioactifs conditionnés dans une matrice verre (La Hague)	600	en cours de consolidation
	B12.2 F2-6-03	-	CSD-C contenant des effluents radioactifs conditionnés dans une matrice verre (Valduc)	360	t_{2015}= 4,7.10^{12} Bq t_{2025}= 4,5.10^{12} Bq t_{2125}= 3,7.10^{12} Bq
	B12.3 F2-4-13	-	Conteneurs « AVM » en acier contenant des effluents vitrifiés issus des rinçages d'équipements de l'usine UP1 de Marcoule	330	t_{2015}=6,1.10^{13} Bq t_{2025}= 4,5.10^{13} Bq t_{2125}= 5,2.10^{12} Bq

Pour ce qui concerne les déchets sodés, les colis types retenus sont :

Niveaux hiérarchiques MID2009 et lien avec l'inventaire national			Intitulés des colis type	Nombre de colis en scénario de base	Activité nominale par colis
Niv 1 et IN	Niv 2 et IN	Niv 3 et IN			
B13	B13.1 F2-4-15	-	Conteneurs en acier contenant divers déchets issus des traitements du sodium dans les installations de R&D du CEA et dans le réacteur Phénix	10	t_{2025}= 6,1.10^{13} Bq t_{2125}= 4,8.10^{12} Bq
	B13.2 F2-4-15 +F2-2-02	-	Conteneurs en acier contenant divers déchets sodés issus des barres de commandes ou de contrôle de réacteurs RNR (Rapsodie, Phénix, Superphénix)	65	en cours de consolidation

1.6.8 Les caractéristiques des déchets

Les options de sûreté couvrent l'ensemble des risques en exploitation (exposition, criticité...) et après fermeture (impact radiologique, perturbation chimique, criticité..) au regard des caractéristiques physico-chimiques et de l'inventaire en radionucléides et toxiques chimiques des colis de déchets identifiés dans le modèle d'inventaire (MID).

Les données détaillées sont décrites dans le modèle d'inventaire (Andra, 2009d) des colis de déchets à haute activité et à vie longue.

L'inventaire radiologique des colis destinés au stockage profond représente plus de 99% de la radioactivité contenue dans les déchets français. Il porte sur une large liste de radionucléides comprenant des produits de fission (PF), d'activation (PA) et des actinides à haute activité et à vie longue qui génèrent des implications en termes de dispositions techniques et organisationnelles pour l'ensemble des installations et des phases de vie. Les colis de déchets HA et MAVL sont respectivement regroupés en familles selon leurs principales caractéristiques radiologiques et géométriques, et suivant leur contenu physico-chimique. L'activité est déclarée de manière systématique par radionucléides dans un tableau respectivement en Bq/colis, g/colis, mol/colis, afin de répondre aux différents besoins en termes de calculs de dose, calculs de concentration, calculs de migration et relâchement.

Inventaire radiologique (144 radionucléides)

Les radionucléides diffèrent par leur période radioactive ; ils se répartissent ainsi en :

Radionucléides à vie courte (31 %), avec une période radioactive n'excédant pas 6 ans,
Radionucléides à vie moyenne (11 %), avec une période radioactive comprise entre 7 et 31 ans,
Radionucléides à vie longue (58 %), avec une période radioactive supérieure à 31 ans.

L'activité à vie longue est très largement concentrée dans les déchets HA : 91% de l'activité en produits d'activation et de fission à vie longue y est localisée ainsi que 97% de l'activité à vie longue en actinides.

Concernant les radionucléides potentiellement gazeux (^{3}H, ^{14}C, ^{85}K, ^{129}I,...) et donc susceptibles d'entraîner des rejets gazeux hors des installations de surface et souterraines en exploitation (cf. chapitres 2 et 3), le producteur doit déclarer un inventaire en termes de débit gazeux (Bq/h/colis).

Afin de pouvoir répondre à l'objectif de protection vis-à-vis du risque de criticité, l'Andra a demandé aux producteurs de décrire, dans le dossier de connaissance, l'origine des déchets (issus du retraitement des combustibles, d'une usine en amont ou en aval du cycle...), leurs paramètres principaux (taux d'enrichissement à l'origine, taux de combustion,...), les caractéristiques physico-chimiques de la matière fissile (forme d'oxyde, métallique, de poudres, d'éclats, aiguilles de combustibles,...) ainsi que l'inventaire des radionucléides, exprimé en grammes par colis, particulièrement pour le ^{239}Pu et l'^{235}U. Ces informations sont nécessaires à l'évaluation du risque de criticité au sein des installations de stockage (cf. chapitres 2, 3 et 4).

La présence ou non de toxiques chimiques dans les colis primaires de déchets est aussi déclarée systématiquement par les producteurs dans les dossiers de connaissances et repris dans le MID pour répondre à la demande du guide de sûreté. La liste des toxiques chimiques retenus actuellement est : le plomb (Pb), le bore (B), le nickel (Ni), le chrome (Cr, dont Cr VI), l'arsenic (As), l'antimoine (Sb), le sélénium (Se), le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le béryllium (Be), le cyanures (CN^-), l'uranium (U) et l'amiante. Leur quantité est exprimée en g/colis pour chaque élément chimique.

Outre l'inventaire des différents radionucléides et toxiques, d'autres caractéristiques des colis et de leur évolution à long terme sont des données d'entrée pour dimensionner le stockage et en démontrer la sûreté, avec des problématiques et niveaux d'incertitudes différents selon les familles de colis. En effet, le conditionnement des déchets doit permettre de retarder et de limiter la dissémination des radionucléides. En outre, il ne doit pas altérer les propriétés favorables de la roche hôte.

Pour les déchets HA, l'intégrité de l'enveloppe métallique du verre pendant la phase thermique et le taux de fracturation du verre sont deux paramètres essentiels de maîtrise du terme source des relâchements de radionucléides à long terme. Pour les déchets MAVL, le confinement, ainsi que la maîtrise des gaz de radiolyse et du risque d'explosion associé sont essentiels, au moins pendant la phase d'exploitation.

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

La diversité des déchets et en particulier leurs caractéristiques (présence de complexants : EDTA, phtalate, TBP), présence d'espèces chimiques potentiellement agressives (aluminium, magnésium, borate et ammonium), présence d'organiques, thermique, relâchement de gaz, etc. peut conduire à organiser l'architecture de manière à disposer d'alvéoles de stockage spécifiques et à mettre en place une distance entre zones pour éviter toute interaction chimique entre sous-zones MAVL et thermique entre zones MAVL et HA (cf. chapitre 4). Par ailleurs, la connaissance des colis pouvant dégager de l'hydrogène permet en exploitation de maîtriser le risque d'explosion (cf. chapitre 3) et après fermeture les conditions d'environnement hydraulique (cf. Chapitre 4). Après fermeture, outre la

vitesse de dégradation de la matrice, c'est essentiellement la perturbation chimique du milieu et la formation de complexants pouvant faciliter la migration des radionucléides qu'il faut maîtriser.

La connaissance précise des colis dès la conception du stockage permet leur prise en compte dans les études d'ingénierie (ex : géométrie, masse, puissance thermique des colis HA pour l'architecture des alvéoles), de sûreté (ex : débit de gaz de radiolyse vis-à-vis du risque explosion, présence de complexants vis-à-vis de la mobilité des radionucléides...) et phénoménologiques (ex : taux de vide pour l'évolution mécanique, interactions physico-chimiques « verre-fer-argile »).

Les sections ci-après reprennent les caractéristiques des colis qui ont servi à établir les options de sûreté au regard des risques d'origine nucléaire, non nucléaire d'origine interne et à long terme présentés dans les chapitres 2, 3 et 4. Les sections suivent l'ordre d'apparition des risques dans ces chapitres.

1.6.8.1 Risques d'origine nucléaire

Tableau 1.6-8 Synthèse des caractéristiques des colis type retenus pour les risques d'origine nucléaire

Risques	Phase exploitation (EXP) et/ou phase après-fermeture (AF)	Installation surface (IS) / fond (IF)	Colis représentatifs retenus pour la conception et les études de sûreté	Caractéristiques et/ou hypothèses retenues
Contamination surfacique	La conception des installations de surface et des équipements associés jusqu'à la mise en colis de stockage des colis primaires prend en compte une contamination surfacique maximale admissible liée à la réglementation transport.			
	EXP	IS et IF	Tous les colis primaires	≤ 4 Bq/cm² (β, γ) ≤ 0,4 Bq/cm² (α)
Dégagement RN gazeux	Le critère de choix retenu pour sélectionner les colis types représentatifs vis-à-vis du risque lié aux dégagements de radionucléides gazeux est le débit gazeux par radioéléments. Toutefois, les caractéristiques de l'ensemble des colis susceptibles d'être stockés ne sont pas connues à ce jour. Les données disponibles concernent l'inventaire total en radioéléments potentiellement gazeux des colis. La cinétique de dégagement n'est pas connue. Seul, le colis CSD-C avec coques et embouts compactés a fait l'objet d'une étude spécifique sur la cinétique de relâchement des radioéléments gazeux.			
	EXP et AF	IS et IF	Colis standards de déchets de coques et embouts compactés (CSD-C), (B5).	^{3}H : ≤ 420 Bq/h/colis ^{85}Kr : ≤ 7080 Bq/h/colis ^{14}C : ≤ 420 Bq/h/colis
Risque de dissémination en situation accidentelle	Le critère de choix retenu pour sélectionner les colis types représentatifs vis-à-vis du risque de dissémination est le niveau de conséquence potentielle en cas de chute d'un colis. • absence de justification de résistance à la chute d'une valeur inférieure à 5 mètres ; • activité radiologique élevée ; • diversité de la typologie du conditionnement du déchet (matrice, liant de blocage, conteneur acier ou béton...). De plus, les colis sélectionnés sont uniquement des colis manutentionnés en individuel ou par pré-empilage. Toutefois, les caractéristiques de l'ensemble des colis susceptibles d'être stockés ne sont pas connues à ce jour. Les colis sélectionnés le sont sur la base des colis suffisamment caractérisés au regard du risque.			
	EXP	IF et IS	Fûts en acier issus du reconditionnement de fûts d'enrobés bitumineux STEL (B2.2) fûts en acier inoxydable contenant des enrobés bitumineux STE3 et STEL (B2.3) fûts en acier non allié contenant des enrobés bitumineux STEL (B2.5)	• Résistance des colis pour une hauteur de 1,2m et 2,2m • De l'ordre de 1,5.10^{12} Bq/colis (2015) • colis manutentionné en individuel nota : c'est le colis le plus fragile des colis MAVL (métallique de faible épaisseur).

Risques	Phase exploitation (EXP) et/ou phase après-fermeture (AF)	Installation surface (IS) / fond (IF)	Colis représentatifs retenus pour la conception et les études de sûreté	Caractéristiques et/ou hypothèses retenues
	EXP	IF et IS	Conteneur amiante-ciment (CAC) ou en béton (CBF-C'2) contenant des déchets technologique divers (B3.1.2)	• Endommagement du colis pour un essai de chute à 2 m. • De l'ordre de $9{,}9.10^{12}$ Bq/colis (2015) • Coque béton+liant hydraulique • colis manutentionné en pré-empilage
	EXP	IF et IS	Fûts en acier contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique (B3.3.7)	• Résistance des colis pour une hauteur de 1,2 m et 2,2 m • De l'ordre de $9{,}8.10^{12}$ Bq/colis (2015) • Fût métallique +liant hydraulique • Colis manutentionné en pré-empilage
	EXP	IF et IS	Fûts en acier contenant des boues de filtration cimentées (B3.4.1)	• Résistance des colis pour une hauteur de 1,8m • De l'ordre de $6{,}5.10^{13}$ Bq/colis (2015) • Fût métallique + boue de filtration (matrice ciment) • Colis manutentionné en pré-empilage
	EXP	IF et IS	Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés (B4.1)	• Endommagement du colis pour un essai de chute à 9 m. • De l'ordre de $6{,}5.10^{13}$ Bq/colis (2015) • Déchets de structure cimentés • Colis manutentionné en pré-empilage
	EXP	IF et IS	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur UNGG – Chinon A (B9.1.3)	• Résistance des colis pour une hauteur de 1,4m • De l'ordre de $8{,}4.10^{12}$ Bq/colis (to production) • Activité totale/colis la plus forte • coque béton + déchets activés (uniquement essais de chute à 1,2m) • Colis manutentionné en individuel
Exposition des opérateurs	Le critère de choix retenu pour sélectionner les colis types représentatifs vis-à-vis du risque lié aux rayonnements ionisants est le débit de dose en beta gamma au contact. Toutefois, les caractéristiques radiologiques de l'ensemble des colis susceptibles d'être stockés ne sont pas connues à ce jour. Les colis sélectionnés le sont sur la base des colis suffisamment caractérisés au regard du risque.			
	EXP	IS et IF	Conteneurs en acier contenant des déchets d'exploitation de l'AVM (B3.3.6)	Environ 30 Sv/h (mesurée en 2007)
	EXP	IS et IF	Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés (B4.3)	13 Sv/h (calculé à la date de 2008)
	EXP	IS et IF	Conteneurs en acier contenant divers déchets issus des traitements du sodium dans les installations de R&D du CEA et dans le réacteur Phénix (B13.1)	12,2 Sv/h max (calculé à la date de 2023)
	EXP	IS et IF	Conteneurs en acier contenant des déchets de structures et déchets divers métalliques issus des traitements des combustibles irradiés à l'APM (atelier pilote de Marcoule), (B4.4)	11,5 Sv/h max (calculé à la date de 2006)
	EXP	IS et IF	Conteneurs « AVM » en acier contenant des effluents vitrifiés issus des rinçages d'équipements de l'usine UP1 de Marcoule (B12.3)	11 Sv/h max (calculé à la date de 2009)

Risques	Phase exploitation (EXP) et/ou phase après-fermeture (AF)	Installation surface (IS) / fond (IF)	Colis représentatifs retenus pour la conception et les études de sûreté	Caractéristiques et/ou hypothèses retenues
	EXP	IS et IF	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) ou des déchets activés d'exploitation (DAE), (B9)	6,5 Sv/h max. (calculé à la date du conditionnement)
	EXP	IS et IF	Déchets vitrifiés conditionnés en colis de type CSD-V (C)	Le DED des colis CSD-V est une fonction décroissante au cours temps (entreposage notamment). Données actuelles : 230 Sv/h pour le C1 après 60 ans de décroissance.
Criticité	Le critère de choix retenu pour sélectionner les colis types représentatifs vis-à-vis du risque lié à la criticité est la masse de matière fissile. Toutefois, les caractéristiques de l'ensemble des colis susceptibles d'être stockés ne sont pas connues à ce jour. Les colis sélectionnés le sont sur la base des colis suffisamment caractérisés au regard du risque.			
	EXP et AF	IS et IF	Colis standards de déchets de coques et embouts compactés (CSD-C), (B5).	La masse de matière fissile nominale est égale à 24 g pour le B5.2.1, 73 g pour le B5.3 Pour l'entreposage (ECC) des B5.2.1 et B5.3, la limite d'admissibilité (MF hétérogène) est égale à : 790 g/colis si 100% ^{235}U 430 g/colis si 100% ^{239}Pu
	EXP et AF	IS et IF	Déchets vitrifiés conditionnés en colis de type CSD-V, (C).	Masse maximale garantie = 110 g de Pu
	EXP et AF	IS et IF	Combustibles usés à base d'uranium (CU3.1.1) et Combustibles usés EL4 (CU3.1.2).	Uranium naturel pour le CU3.1.1 Uranium enrichi entre 1,41% et 2,5%
Thermique	Le critère de choix retenu pour sélectionner les colis types représentatifs vis-à-vis du risque lié à la thermicité des déchets est la puissance thermique maximale par colis. Toutefois, il convient de noter que les caractéristiques thermiques de l'ensemble des colis susceptibles d'être stockés ne sont pas connues. Les colis sélectionnés le sont sur la base des colis suffisamment caractérisés au regard du risque.			
	EXP et AF	IS et IF	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) ou des déchets activés d'exploitation (DAE), (B9)	En 2052 : Qcq C1PG à + de 150W (339 colis > 90W, 233 colis entre 10 et 90 W et 358 colis < 10W)
	EXP et AF	IS et IF	CSD-C produits suivant la spécification 300AQ 055 (B5.2.1)	38,8 W/colis max. (448 colis > 20 W, 2369 colis entre 10 et 20 W et 340 < 10 W)
	EXP et AF	IS et IF	Déchets vitrifiés conditionnés en CSD-V	Hypothèse de référence : environ 500 W avec données actuelles de 540 W pour le C1 après 50 ans de décroissance et 523 W pour le C5 après 60 ans de décroissance. Variante avec colis à 1 000 W pour entreposage. Fonction des choix de conception et donc du temps de décroissance et de refroidissement à la date de réception dans les installations de surface et de fond.
Risque lié aux dégagements de gaz de radiolyse	Le critère de choix retenu pour sélectionner les colis types représentatifs vis-à-vis du risque d'explosion est le débit d'hydrogène par colis primaire. Il convient de noter que l'évaluation du débit d'hydrogène n'a pas été effectuée par les producteurs sur l'ensemble des colis types. Les colis représentatifs ont donc été sélectionnés sur la base des colis suffisamment caractérisés. Une valeur de 10 litres par colis et par an a été retenue pour les spécifications de niveau 2 du stockage. Toutefois, la conception du stockage permet de stocker des colis ayant une cinétique de dégagement d'H_2 plus importante. Par ailleurs, le dégagement d'hydrogène du colis primaire décroit dans le temps. Un mode de gestion par le délai d'entreposage des colis avant mise en stockage est donc possible.			
	EXP et AF	IS et IF	Colis en acier issus du reconditionnement de fûts d'enrobés bitumineux STEL (B2.2) fûts en acier inoxydable contenant des enrobés bitumineux STE3 et STEL (B2.3)	De l'ordre de 10 l/colis.an pour un colis d'activité moyenne colis STEL produits depuis 1995 (calculé à 2003) De l'ordre de 3 l/ colis.an pour les

Risques	Phase exploitation (EXP) et/ou phase après-fermeture (AF)	Installation surface (IS) / fond (IF)	Colis représentatifs retenus pour la conception et les études de sûreté	Caractéristiques et/ou hypothèses retenues
			fûts en acier non allié contenant des enrobés bitumineux STEL (B2.5)	autres colis bitume (calculé à 2003)
	EXP et AF	IS et IF	Conteneur amiante-ciment (CAC) ou en béton (CBF-C'2) contenant des déchets technologique divers (B3.1.2)	De l'ordre de 10 l/colis.an (après 8 ans d'entreposage)
	EXP et AF	IS et IF	Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés (B4.1)	De l'ordre de 120l/fût.an entre 2015 et 2025. De l'ordre de 20l/fût.an à partir de 2045.
	EXP et AF	IS et IF	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) ou des déchets activés d'exploitation (DAE), (B9).	De l'ordre de 20 l/colis.an après 5 ans d'entreposage (pic de production) De l'ordre de 10 l/colis.an après 10 ans d'entreposage

1.6.8.2 Risque non nucléaire d'origine interne

Tableau 1.6-9 Synthèse des caractéristiques des colis type retenus pour les risques non nucléaires d'origine interne

Risques	Phase exploitation (EXP) et/ou phase aprés fermeture (AF)	Installation surface (IS) / fond (IF)	Colis représentatifs retenus pour la conception et les études de sûreté	Caractéristiques et/ou hypothèses retenues
Risque lié à l'incendie	Le critère de choix retenu pour sélectionner les colis types représentatifs vis-à-vis du risque lié à l'incendie est « la sensibilité au feu » (risque d'ignition : points de ramollissement, point éclair, T° d'auto inflammation).			
	EXP et AF	IS et IF	Colis contenant des enrobés bitumineux (B2)	Température maximale de la matrice égale à 120°C Point éclair : 260-270°C Point de feu : 310-320°C
Risque lié aux opérations manutention	Voir chapitre relatif au risque de dissémination en situation accidentelle			

1.6.8.3 Risques complémentaires vis-à-vis du long terme

Maîtriser les risques à long terme, c'est notamment vérifier que les performances des composants (du colis de stockage à la roche hôte) sont assurées à long terme. L'analyse de sûreté après fermeture s'appuie sur la connaissance du contenu radiologique (activité de chaque radionucléide, période radioactive) et des caractéristiques chimiques des radioéléments.

Tableau 1.6-10 Synthèse des caractéristiques des colis type retenus pour les risques à long terme

Risques	Phase exploitation (EXP) et/ou phase après-fermeture (AF)	Installation surface (IS) / fond (IF)	Colis représentatifs retenus pour la conception et les études de sûreté	Caractéristiques et/ou hypothèse
Risques interactions entre colis de déchets	Afin de limiter les interactions (thermique, chimique, gaz…) possibles entre colis de déchets, la conception du stockage a retenue le principe d'indépendance phénoménologique selon les critères suivants :			
	Les alvéoles de type 2 : alvéoles dédiés aux déchets en matrice bitumineuse.			
	AF	IF	Fûts contenant des enrobés bitumineux (B2)	Quantité de Matières organiques et complexants
	Les alvéoles de type 2 dédiées : alvéoles dédiées aux déchets contenant des déchets organiques. Ces colis sont séparés des autres colis de déchets afin de prévenir l'influence possible de leurs inventaires en produits organiques et/ou complexants sur l'inventaire en radionucléides des colis de déchets étant exempt de matière organique.			
	AF	IF	Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume, (B11.1) Conteneurs 870 litres en acier contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique, (B11.2) Fûts en acier contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique (B3.3.7) Fûts en acier contenant des déchets technologiques métalliques et organiques, (B3.3.1)	Quantité de matières organiques et complexants
	Les alvéoles de type 1 h qui accueillent des colis de déchets produisant de l'hydrogène par radiolyse du béton des colis primaire			
	AF	IF	Conteneur de 500 litres en béton contenant des fûts de concentrats d'évaporation cimentées (B3.2.3) Fûts en acier contenant des boues de filtration cimentées (B3.4.1) Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) issus du réacteur (B9)	De l'ordre de 10 l/colis.an
	Les alvéoles de type 1 x qui accueillent des colis de déchets ne produisant pas d'hydrogène par radiolyse du béton des colis primaire			
	AF	IF	Colis standards de déchets de coques et embouts compactés (CSD-C), (B5). CSD-B en acier contenant des effluents radioactifs conditionnés dans une matrice verre (La Hague), (B12.1)	Pas de production d'hydrogène par radiolyse du béton des colis primaires

Risques	Phase exploitation (EXP) et/ou phase après-fermeture (AF)	Installation surface (IS) / fond (IF)	Colis représentatifs retenus pour la conception et les études de sûreté	Caractéristiques et/ou hypothèse
Risques liés à la présence de Radionucléides mobiles.	Colis contenant l'inventaire en ^{36}Cl le plus important Il convient de noter que l'évaluation de l'inventaire en radioélément n'a pas été effectuée par les producteurs sur l'ensemble des colis types. Les colis représentatifs ont donc été sélectionnés sur la base des colis suffisamment caractérisés.			
	AF	IF	Conteneur de 500 litres en béton contenant des fûts de boues de filtration cimentés, (B3.2.4) ; Fûts en acier contenant des boues de filtration cimentées, (B3.4.1) ; Fûts en acier contenant des déchets de structures magnésiens cimentés, (B4.2) ; CSD-C produits suivant la spécification 300AQ 055, (B5.2.1) ; CSD-V- solution de produits de fission vitrifiée (C1)	$5,3.10^{-3}$ mol/colis $7,8.10^{-3}$ mol/colis $7,3.10^{-3}$ mol/colis $7,3.10^{-3}$ mol/colis $4,4.10^{-2}$ mol/colis
	Colis contenant l'inventaire en ^{14}C Il convient de noter que l'évaluation de l'inventaire en radioélément n'a pas été effectuée par les producteurs sur l'ensemble des colis types. Les colis représentatifs ont donc été sélectionnés sur la base des colis suffisamment caractérisés.			
	AF	IF	CSD-C contenant des déchets de structure sans déchet technologique (silo HAO), (B5.3) ; Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés, (B4.1) ; Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD), (B9.1.1) ; CSD-V- solution de produits de fission vitrifiée (C5)	$3,5.10^{-3}$ mol/colis $7,0.10^{-3}$ mol/colis $5,6.10^{-3}$ mol/colis $1,8.10^{-3}$ mol/colis
	Colis contenant l'inventaire en ^{129}I Il convient de noter que l'évaluation de l'inventaire en radioélément n'a pas été effectuée par les producteurs sur l'ensemble des colis types. Les colis représentatifs ont donc été sélectionnés sur la base des colis suffisamment caractérisés.			
	AF	IF	Fûts en acier contenant des déchets de structures magnésiens cimentés (B4.2) Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés (B4.1) CSD-C produits suivant la spécification 300AQ 055 (B5.2.1) Conteneur contenant des éléments combustibles de type EL4 issus de la centrale de Brennilis (CU3.1.2) CSD-V- solution de produits de fission vitrifiée (C5)	47 mol/colis $6,3.10^{-3}$ mol/colis $5,3.10^{-3}$ mol/colis $1,6.10^{-2}$ mol/colis $2,7.10^{-2}$ mol/colis
Risques associés aux taux de vide dans les colis primaires	Il convient de noter que le taux de vide des colis primaire n'est pas évalué systématiquement par les producteurs sur l'ensemble des colis types. Par ailleurs, certains déchets sont susceptibles d'être reconditionné. Les colis représentatifs ont donc été sélectionnés sur la base des colis suffisamment caractérisés.			
	AF	IF	Conteneurs métalliques issus du reconditionnement de conteneurs en béton « 1000 litres » (B3.1.1) Conteneur amiante-ciment (CAC) ou en béton (CBF-C'2) contenant des déchets technologique divers (B3.1.2) Fûts en acier contenant des boues de filtration cimentées (B3.4.1) Conteneur en acier contenant des déchets vitrifiés PIVER(C0.1)	5% de taux vide en moyenne 25% Environ 20% avec une plage de variation entre quelque pourcents et 70% En moyenne 30% de taux de vide mais avec un maxi à 85%

1.6.9 Les colis de stockage

Les colis primaires MAVL sont conditionnés dans des conteneurs de stockage MAVL qui répondent aux objectifs suivants :

- protéger le colis primaire de déchets : (i) en fonctionnement normal, par sa tenue mécanique pour la manutention et le gerbage, et (ii) en fonctionnement accidentel (principalement vis-à-vis de la chute ou de l'incendie),
- prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, émission de gaz, évolution du déchet dans le temps…),
- prendre en compte l'exigence de réversibilité, par un maintien de l'intégrité du colis sur une période a minima séculaire,
- minimiser les vides résiduels dans l'alvéole de stockage et contribuer ainsi à limiter dans le temps les déformations dans la formation des argilites du Callovo-Oxfordien,
- simplifier les processus d'exploitation face à la grande diversité des colis de déchets : leur regroupement dans des colis de stockage de plus grande capacité réduit les flux d'objets manutentionnés dans les alvéoles, notamment pour les colis primaires de faible volume ; de plus, le complément de colisage standardise les dimensions et limite de ce fait les modes de mise en place de ces objets.

Le colis de stockage HA est conçu pour recevoir unitairement un colis primaire de déchets, ou des étuis de combustibles usés et répond aux objectifs suivants :

- protéger les déchets vitrifiés HA ou les combustibles usés d'une arrivée d'eau pendant la phase dite « thermique » du colis. Cette fonction conduit à attribuer une exigence d'étanchéité au colis de stockage pour une durée pluri-centenaire à millénaire (suivant le type de déchets),
- permettre le développement d'un processus réversible de stockage des déchets HA et CU3 (mise en alvéole et retrait).

Le chapitre 2 décrit les opérations de réception des colis primaires, de conditionnement des colis primaires en colis de stockage, des conditions d'entreposage et la maîtrise des risques associés. Le chapitre 3 décrit les fonctions de sûreté des colis de stockage en exploitation notamment au regard des risques associés aux opérations relatives aux transferts et à la mise en alvéole de ces colis. Le chapitre 4 détaille les fonctions de sûreté assignées à ces colis de stockage au regard de la maîtrise des incertitudes après fermeture.

1.6.10 Le site et l'implantation des installations

La démarche d'implantation du projet de centre de stockage est progressive. Le décret du 16 avril 2008 (décret n°2008-357 pris pour l'application de l'article L.542-1-2 du code de l'environnement et fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs) définit des étapes en vue du choix de site. L'Andra a transmis en 2009 au gouvernement une proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface (Andra, 2009f).

1.6.10.1 Implantation des installations souterraines du centre de stockage

Dans le Dossier 2005 « Argile », l'Andra a défini une zone d'environ 250 km^2 autour du Laboratoire, dite « zone de transposition », dans laquelle les résultats obtenus dans le Laboratoire peuvent être transposés, tant du point de vue des propriétés de confinement de la formation que des caractéristiques des perturbations qu'engendrerait un stockage. Les propriétés de la couche argileuse dans la zone de transposition sont favorables à l'implantation des installations souterraines d'un centre de stockage.

Sur la période 2007-2008, une campagne d'investigations géologiques (forages, géophysique, levers cartographiques) a été réalisée à l'échelle de la zone de transposition. Dans cette optique, 14 forages et une campagne de sismique 2D correspondant à un linéaire total de 170 kilomètres ont été réalisés et 130 km de sismique ancienne ont fait l'objet de retraitements.

Les résultats permettent de vérifier que le périmètre de la zone de transposition, tel que défini dans le Dossier 2005 (Andra, 2005a), ne subit pas de modifications importantes. Les différents paramètres retenus pour sa définition ont été réétudiés à la lumière des résultats complémentaires obtenus à l'issue de cette campagne (Andra, 2009h). Les conclusions permettent en particulier de préciser les limites de la couche du Callovo-Oxfordien et sa géométrie avec une précision d'ordre métrique et de confirmer (i) l'homogénéité du contexte sédimentaire et des propriétés de la couche et (ii) l'absence de failles mineures. Les résultats issus d'un forage recoupant les 2 000 mètres de formations sédimentaires du bassin de Paris permettent en outre de conclure à l'absence de ressources géothermiques exceptionnelles sur le secteur.

Cela confirme que l'implantation des installations souterraines du stockage peut, sur la base des informations recueillies à ce stade, être réalisée sur l'ensemble de la zone de transposition soit 250 kilomètres carrés.

L'Andra avait indiqué, dans la programmation des travaux qu'elle envisageait de réaliser au-delà de 2005, qu'à la suite d'une campagne de reconnaissance complémentaire concernant l'ensemble de la zone de transposition, elle proposerait la définition d'une zone de l'ordre de la trentaine de kilomètres carrés sur laquelle serait ensuite menée une campagne de géophysique 3D destinée à obtenir des informations encore plus précises en vue de l'implantation d'un stockage. Il s'agit donc désormais d'établir à partir des connaissances géologiques et géophysiques les bases sur lesquelles on pourrait d'une part durcir les critères existants et d'autre part prendre en compte d'éventuels critères additionnels.

Plusieurs principes ont été retenus pour conduire cette analyse complémentaire.

Comme pour l'analyse qui a conduit à délimiter la zone de transposition, les critères étudiés concernent la couche du Callovo-Oxfordien. C'est en effet sur les propriétés de cette couche que reposent :

- la possibilité d'implanter des infrastructures de stockage au regard de critères géométriques : épaisseur relativement constante, pendage limité et absence de fractures d'un rejet significatif,
- la capacité à réaliser des infrastructures de stockage adaptées aux différents types de colis de déchets : aptitude au creusement, compatibilité des argilites avec les matériaux utilisés pour réaliser le stockage,
- l'aptitude à répondre à un ensemble de fonctions concourant à la sûreté à long terme du stockage comme : s'opposer aux circulations d'eau ou retarder et atténuer la migration des éléments radioactifs et toxiques vers l'environnement.

Le niveau a priori considéré en référence pour l'implantation du stockage est celui étudié au niveau principal du Laboratoire souterrain, correspondant à la partie la plus argileuse de la formation nommée Intervalle de Maximum d'Argilosité (IMA). Celui-ci se définit comme un niveau caractéristique d'épaisseur variant de 15 mètres (sur le site du Laboratoire souterrain) à plus de 35 mètres (dans la partie nord de la zone de transposition) où les paramètres géophysiques enregistrés par diagraphies varient peu et où la teneur en argiles évolue entre 50 et 60 % (Andra, 2009i).

Les critères sont évalués principalement en fonction de leur potentiel impact sur la sûreté du stockage en exploitation et après-fermeture ainsi que sur la nature des moyens à mettre en œuvre pour réaliser les infrastructures souterraines.

A ce stade du travail, il est apparu pertinent de ne faire reposer l'analyse que sur des critères très objectifs pour lesquels on dispose, soit par mesure directe (forages et sismique 2D) soit par modélisation des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la pile sédimentaire, d'informations :

- suffisamment discriminantes pour faire émerger un zonage non ambigu,
- réparties de façon homogène sur la zone de transposition,
- d'une densité suffisante (mesure ou modélisation) pour permettre une analyse sur l'ensemble de la zone de transposition.

Ainsi, sur la base de calculs de performance réalisés (Pépin, 2008), les critères retenus dans la démarche sont :

Les gradients : les zones susceptibles d'être le siège des gradients verticaux les plus élevés (et qui laissent un peu moins de marges de conception en matière de dégroupage des puits d'accès) apparaissent, en situation hypothétique fortement dégradée, moins favorables à l'implantation des installations souterraines. Pour définir une zone privilégiée pour implanter les installations souterraines du stockage, on a donc retenu la zone qui présente actuellement les gradients hydrauliques les plus faibles et dans tous les cas inférieurs à 0.2 m/m.

L'épaisseur totale de la formation : pour améliorer la sûreté à long terme mais également pour faciliter l'exploitation du stockage, l'épaisseur minimale retenue pour l'implantation des infrastructures souterraines dans le Callovo-Oxfordien est une épaisseur minimale de Callovo-Oxfordien de 140 mètres, ce qui conduit à retenir essentiellement un secteur situé de 2 à 5 kilomètres au nord de la limite sud de la zone de transposition.

La profondeur : pour minimiser d'une part l'endommagement potentiel de la roche lors du creusement et d'autre part les quantités de matériau de revêtement dans les infrastructures de stockage, il est privilégié une profondeur maximale de l'ordre de 550 à 600 mètres. La borne supérieure de 600 mètres a été retenue pour définir la zone privilégiée.

Pour proposer une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA), l'Andra a privilégié une implantation dans la zone identifiée comme plus intéressante vis-à-vis des critères liés à la géologie et à la sûreté identifiés précédemment. Des critères liés à l'aménagement du territoire et à l'insertion locale ont également été pris en compte (Andra, 2009f).

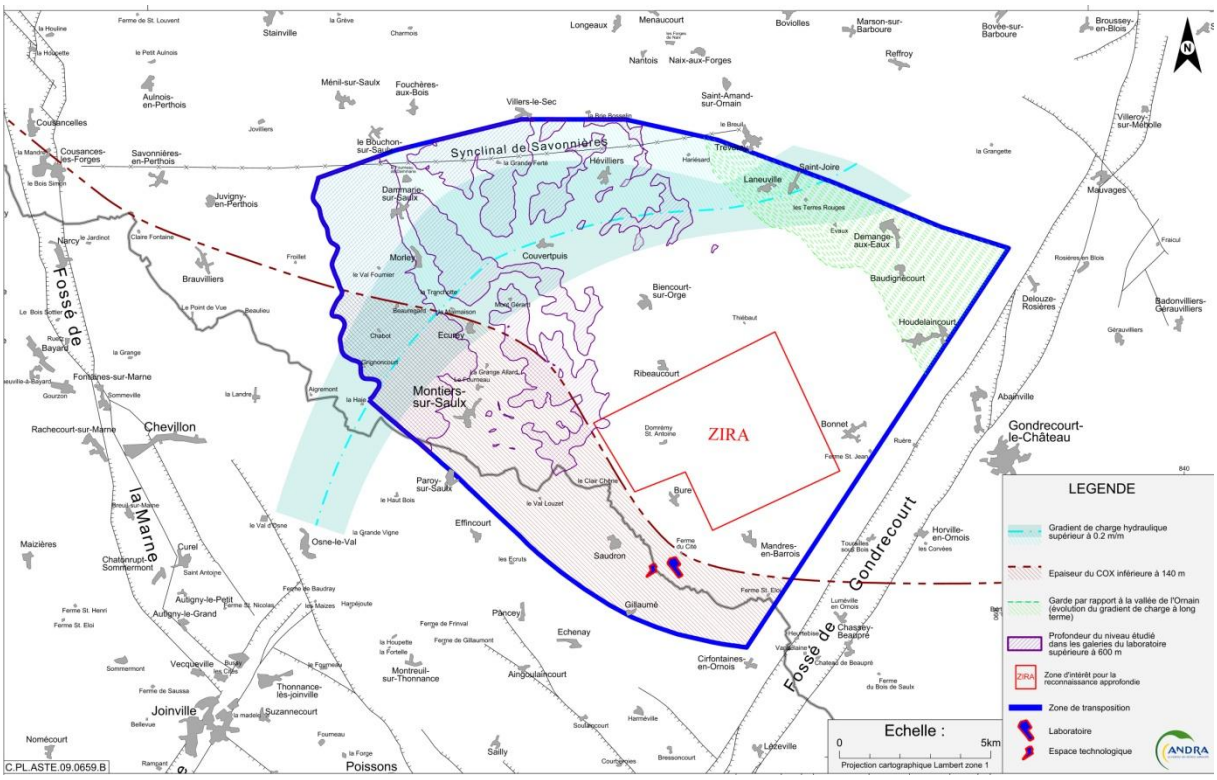


Figure 1.6-3 *Délimitation de la zone privilégiée pour implanter la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) : partie blanche au sein de la zone de transposition, et ZIRA proposée par l'Andra*

A partir de 2010, des investigations détaillées (sismique 3D) seront menées sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie, dont la superficie est de l'ordre d'une trentaine de kilomètres carrés. Cette seconde campagne de reconnaissance permettra en particulier d'établir le modèle géométrique

de détail du Callovo-Oxfordien et d'identifier l'existence ou non d'éventuelles structures tectoniques (failles secondaires et failles mineures) en support aux études de conception du centre de stockage.

1.6.10.2 Implantation des installations de surface du centre de stockage

Dans les études 2007-2009, la possibilité de découpler une partie des installations de surface des installations souterraines au moyen d'une descenderie a été examinée. A titre d'illustration, une descenderie « déroulée » avec une pente de l'ordre de 10 % pourrait offrir une flexibilité d'implantation pour l'entrée de cet ouvrage jusqu'à environ 5 km par rapport à la zone des puits.

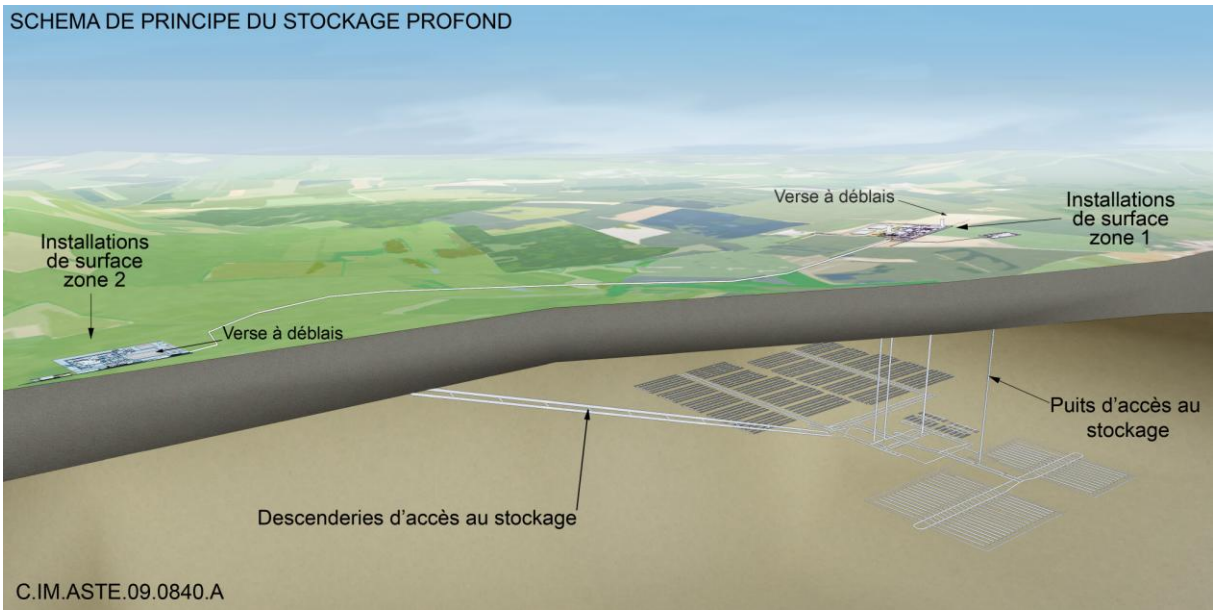


Figure 1.6-4 Illustration d'un découplage des installations

L'implantation des installations de surface du centre de stockage doit prendre en compte les contraintes environnementales (zones urbanisées, périmètres de protection des captages, zones inondables, ZNIEFF, Natura 2000…) et les contraintes liées à la sûreté (risques liés à la chute d'avion, risques liés aux événements d'origine naturelle, risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication).

Une carte de synthèse des contraintes de surface permet ainsi d'identifier la zone à privilégier pour l'implantation des installations de surface (zone verte sur la carte ci-dessous). L'emprise de cette zone est d'environ 130 kilomètres carrés, dont 80 à l'intérieur de la zone de transposition, ce qui donne une flexibilité importante pour proposer des scénarios d'implantation en surface à étudier. Une analyse des données socio-économiques et des infrastructures de transport existantes a également été réalisée.

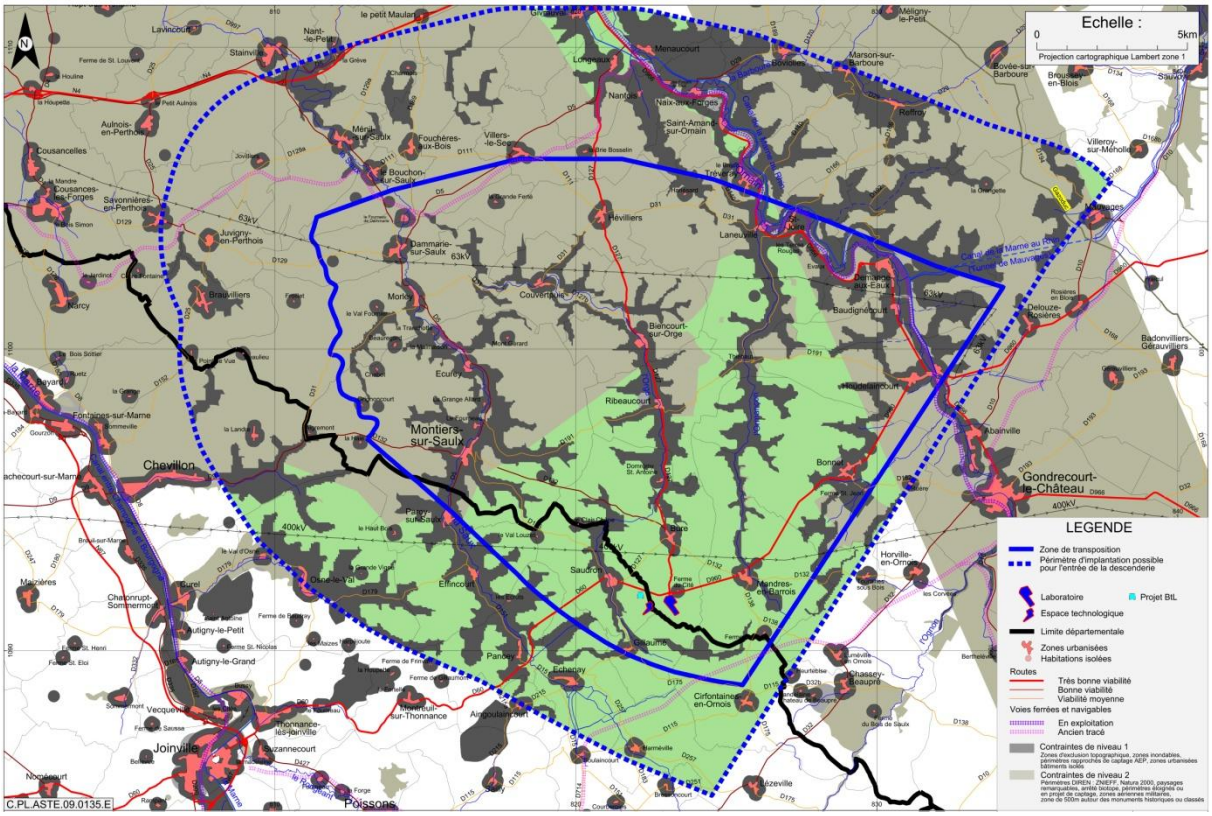


Figure 1.6-5 Carte de synthèse des contraintes de surface (Andra, 2009f)

Le présent document inventorie les caractéristiques du site qui peuvent influer sur la sûreté de l'installation. Les dispositions à prendre le cas échéant vis-à-vis de ces agressions sont présentées dans le chapitre 2 et sont classées en deux catégories :

Les événements d'origine humaine : chute d'avions (aviations commerciale, militaire, générale), environnements industriels et voies de communication.

Les événements d'origine naturels : séismes, conditions climatiques extrêmes, foudre, inondation externe, incendie externe.

Pour chacun des ces aléas, la démarche consiste à identifier :

- leur nature avec une description fondée sur des cartographies ou une connaissance de la zone,
- leur occurrence sur la zone considérée, quantifiée en terme de probabilité dans certains cas (ex : chute d'avion au regard de la RFS I.1.a), en se fondant notamment sur la connaissance de ces aléas dans la zone (ex : carte des zones inondables…) et sur le REX d'observations et de mesures (ex : température, densité de foudre),
- selon l'occurrence et/ou la gravité, cela peut conduire à exclure certaines zones potentielles et/ou identifier des zones pour lesquelles seront imposées des exigences de dimensionnement pour les futures installations.

A l'issue de l'analyse par type d'agressions, une cartographie récapitulant les contraintes vis-à-vis de l'implantation des installations de surface est établie.

En s'appuyant sur cette analyse et en prenant en compte les critères liés à l'aménagement du territoire, l'Andra a proposé des zones potentielles d'implantation pour les installations de surface compatibles avec la ZIRA proposée. Les études seront ensuite poursuivies sur cette base.

Les options de sûreté du présent document, présentées dans le chapitre 2, seront consolidées au moment du choix d'implantation des installations (surface et fond) au sein des ZIRA et ZIIS retenues sur la base de ces nouveaux éléments.

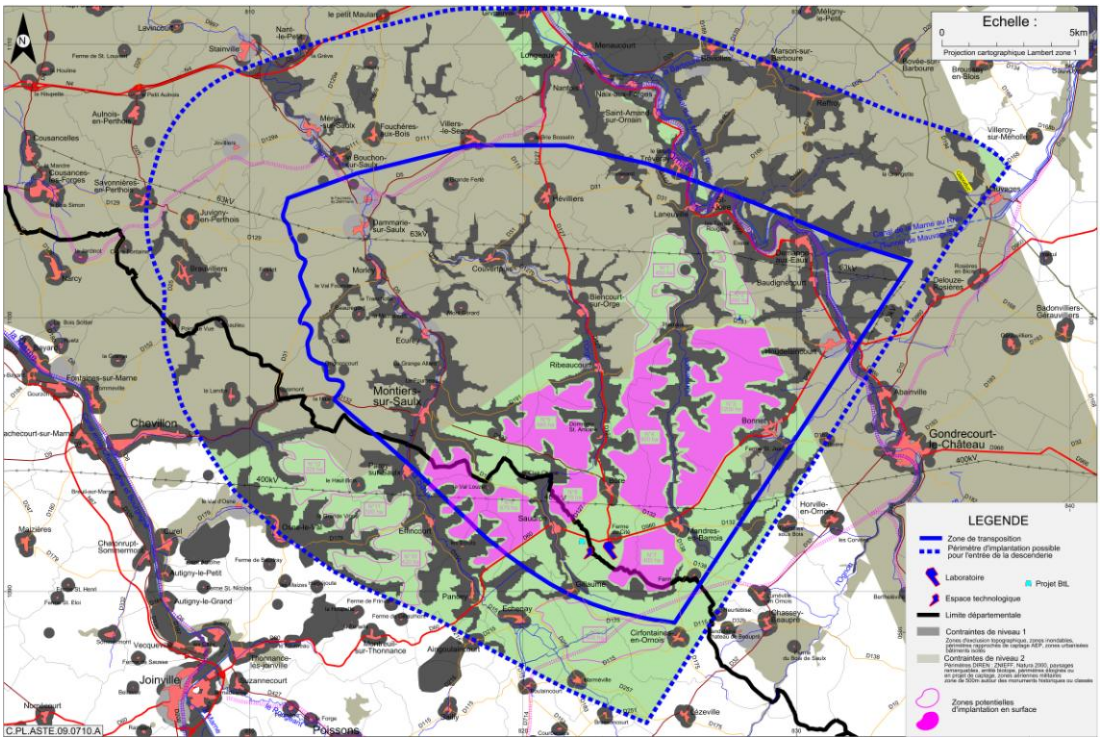


Figure 1.6-6 *Proposition de scénarios d'implantation en surface à étudier (en violet) compatibles avec la ZIRA proposée*

1.6.11 Les installations

Le centre de stockage est constitué d'installations en surface et en souterrain, reliées par des ouvrages de liaison. Ces ouvrages, qui peuvent être des puits verticaux ou des descenderies (galeries inclinées), sont couramment employés dans les travaux souterrains.

Au stade de l'étude de faisabilité du Dossier 2005, il avait été examiné en référence l'utilisation de puits verticaux pour gérer les différents flux entre la surface et les installations souterraines (ventilation, colis, travaux, personnel). Cette solution technique conduit à implanter les installations de surface à l'aplomb des installations souterraines.

Dans les études 2007-2009, la possibilité de découpler une partie des installations de surface des installations souterraines au moyen d'une descenderie a été examinée. A titre d'illustration, une descenderie « déroulée » avec une pente de l'ordre de 10 % pourrait offrir une flexibilité d'implantation pour l'entrée de cet ouvrage jusqu'à environ 5 km par rapport à la zone des puits.

Deux zones d'activité en surface, potentiellement disjointes, peuvent ainsi être considérées :

La zone « puits » est nécessairement située à l'aplomb des installations souterraines. Elle pourrait notamment comprendre des installations en support aux travaux souterrains (transport du matériel et des matériaux, extraction des déblais excavés, transport des personnels travaux...). Son emprise est estimée de l'ordre de 200 hectares[17] au terme d'une centaine d'années d'exploitation (cette emprise est notamment liée à l'entreposage en surface des déblais générés par la construction progressive des modules de stockage).

[17] Estimation à confirmer dans la suite des études.

La zone « descenderie » pourrait notamment comprendre les installations liées à la réception, à la préparation et au transfert des colis de déchets. Son emprise est estimée de l'ordre d'une centaine d'hectares.

Cette flexibilité d'implantation offerte par la descenderie pour une partie des installations de surface a conduit à définir un périmètre élargi par rapport à la zone de transposition, dans lequel l'entrée de la descenderie et les installations associées pourraient être implantées. Ce périmètre est compris dans un rayon maximal de 5 km par rapport à la limite de la zone de transposition. Il est réduit au sud et à l'est pour éviter de traverser avec la descenderie les zones de fracturation connues.

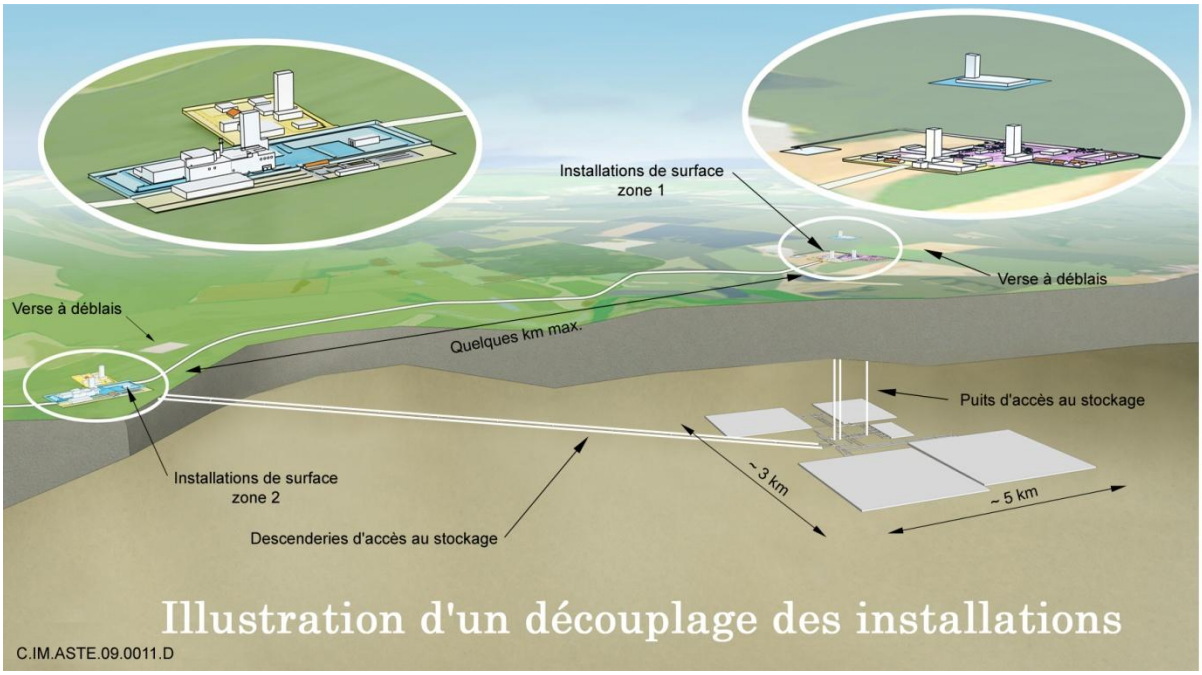


Figure 1.6-7 Les différentes installations du futur centre de stockage

1.6.11.1 Les installations de surface

Les installations de surface peuvent être implantées au sein d'une seule zone d'implantation qui, du fait de la nécessité des puits desservant les installations du stockage souterrain, serait alors située à l'aplomb du stockage souterrain. On peut aussi choisir une solution plus ouverte avec deux zones de surface déconnectées. Dans ce cas, si la première zone (zone « puits ») est toujours nécessairement à l'aplomb des installations souterraines, la seconde zone, liée à l'implantation des entrées de descenderies, peut en être éloignée de quelques kilomètres. Cette dernière hypothèse, qui apporte plus de flexibilité pour l'implantation des futures installations du stockage, est celle qui est privilégiée par l'Andra (cf. Figure 1.6-7).

La zone « puits » comprendrait essentiellement des installations en support aux travaux souterrains (transport du matériel et des matériaux, extraction des déblais excavés, accès personnel…) ainsi que les puits de retour d'air. Son emprise serait de l'ordre de 200 hectares[18]. Une grande partie de cette superficie (de l'ordre de 130 ha[19]) est liée à la verse de déblais provenant du creusement des ouvrages souterrains.

La zone « descenderies » comprendrait les installations liées à la réception des colis de déchets, à la préparation, au conditionnement et au transfert des colis de stockage, les installations liées à la descenderie de transfert des colis et à la descenderie de service, ainsi que la verse des déblais

[18] Cette estimation sera à réviser dans la suite des études en intégrant des facteurs propres au site (topographie, environnement…).

[19] Cette estimation correspond à une extension maximale. Elle ne tient pas compte de la reprise d'une partie des déblais pour le remblaiement des ouvrages souterrains lors des travaux de fermeture du stockage.

provenant du creusement de ces ouvrages. Son emprise serait de l'ordre d'une centaine d'hectares, dont environ 40 ha pour la verse.

Le chapitre 2 se focalise sur les installations de surface. Il reprend les éléments descriptifs des locaux et opérations disponibles, à ce stade du document (Andra, 2009c), et présente les options de sûreté associées.

1.6.11.2 Les ouvrages de liaison surface-fond

On prévoit un ensemble composé de quatre puits et d'une descenderie double tubes pour gérer l'ensemble des flux (colis, déblais, personnes, air) à transférer :

- un tube de la descenderie exclusivement réservé au *transfert des colis* ; le second tube de la descenderie pourra assurer des flux limités de matériels et/ou de personnel et servir comme issue de secours pour l'ensemble des installations souterraines du stockage,
- deux puits réservés exclusivement au *retour d'air*, pour assurer l'ensemble des retours d'air et des désenfumages. Un puits est dédié spécifiquement à la zone MAVL, le second prenant en charge les autres zones de stockage et l'ensemble des infrastructures[20],
- un *puits de personnel* et un *puits de travaux* pour assurer l'ensemble des autres flux, y compris l'alimentation des installations souterraines en air frais.

Cette configuration permet une séparation des flux de transfert des colis (descenderie dédiée) de ceux liés aux travaux de construction des ouvrages souterrains (puits de travaux et second tube de la descenderie). Elle permet aussi de séparer les flux de personnel (puits dédié et second tube de la descenderie) des flux de transfert des colis (descenderie dédiée). Les flux de ventilation empruntent les ouvrages de liaison décrits précédemment pour ce qui concerne l'arrivée en air neuf et possèdent un retour d'air séparé et dédié, l'un à la zone MAVL, l'autre au reste des installations.

Ces différents ouvrages rejoignent les installations du stockage souterrain au niveau de la zone « centrale ».

1.6.11.3 Les installations souterraines

Les installations souterraines sont organisées autour de la zone centrale.

La zone centrale répond aux quatre fonctionnalités suivantes :

- la réception et l'évacuation des matériaux de construction (déblais, bétons, remblais, matériels et matériaux divers),
- la réception des hottes de transfert des colis pleines et vides,
- le support au fonctionnement des installations souterraines,
- l'amenée et le retour d'air.

A partir de cette zone, des faisceaux de galeries de liaison parallèles qui permettent de desservir les différentes zones de stockage (MAVL avec organiques, MAVL sans présence d'organique, C0 – CU3, HA exothermiques) pour répondre notamment aux exigences de sûreté après fermeture. Le nombre de galeries de liaison sera fonction de l'importance des flux à gérer.

La conception de l'architecture générale du stockage doit permettre d'assurer la sécurité du travail (réalisation des travaux) et la sûreté nucléaire en exploitation (sûreté opérationnelle). La co-activité entre les activités nucléaires et les activités de génie civil est gérée par une spécialisation au sein des faisceaux de galeries entre celles qui sont dédiées au transfert des colis de stockage et celles dédiées aux travaux. Le chapitre 3 présente les options de sûreté relatives à l'exploitation des installations souterraines et en particulier aux opérations de transfert des colis de stockage, de la mise en stockage des colis dans les alvéoles et de leur reprise éventuelle.

La construction doit aussi permettre un développement progressif de l'architecture du stockage et offrir une souplesse de gestion pour tenir compte d'une variation possible des colis à stocker, en

[20] Selon l'architecture d'ensemble du stockage qui pourrait être retenue, un puits de retour d'air supplémentaire au niveau des galeries de liaison principale de la zone de stockage HA pourrait s'avérer nécessaire.

termes de quantités ou de caractéristiques. Aussi la figure ci-dessous montre une illustration de l'architecture souterraine globale envisagée sur la base des choix d'options (nombre de galeries, longueurs d'alvéoles, diamètres...) décidés à ce stade du projet. Le chapitre 4 se fonde sur cette description et présente comment cette architecture permet de maîtriser les incertitudes et les impacts associés.

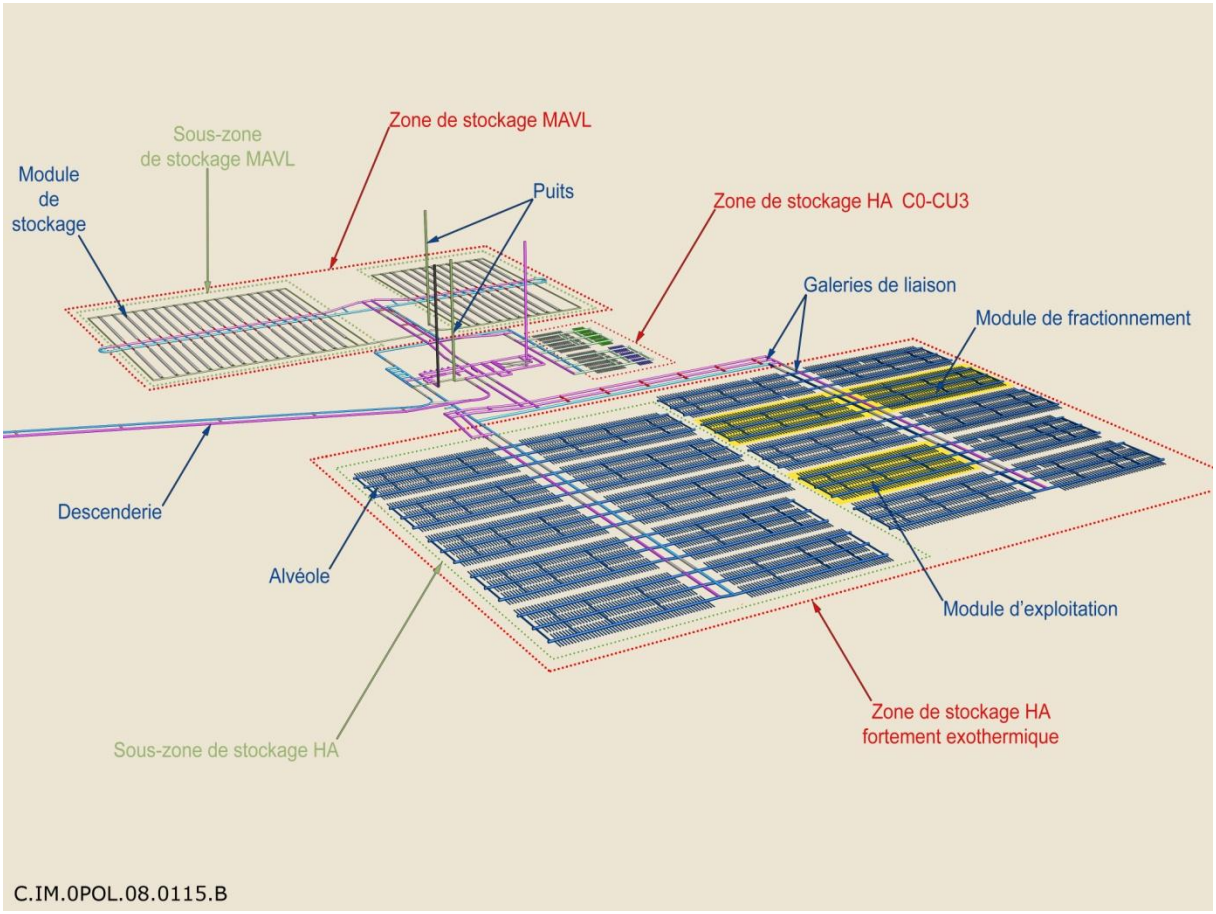


Figure 1.6-8 Exemple d'architecture de stockage

1.6.12 Les fonctions de sûreté

Pendant la période au cours de laquelle le stockage est actif, qui peut durer plus d'un siècle, le stockage est l'objet d'opérations :

- de construction, pour mettre en place les ouvrages d'accès, les alvéoles, les utilités nécessaires au fonctionnement,
- d'exploitation, destinées à la mise en place des colis de déchets, et dans le cas où une telle situation se présenterait, de retrait des colis dans un cadre de sûreté voire de réversibilité,
- d'observation et de surveillance, destinées à acquérir des paramètres sur l'évolution du stockage à court et moyen terme,
- d'opérations de fermeture des alvéoles, modules et zones de stockage, dans un processus par étape conduisant à la phase après-fermeture.

Après fermeture, le stockage est « passif » et la sûreté ne doit pas reposer sur des dispositifs actifs y compris la surveillance.

En **phase d'exploitation**, la fonction principale est d'accueillir les colis, les fonctions de sûreté se déduisent des voies d'atteinte et des risques principaux induits par les déchets radioactifs (risques de dissémination, d'exposition..). Elles sont valables pour toutes les phases au cours desquelles des opérateurs sont susceptibles d'être présents dans le stockage et de manipuler les colis (mise en place,

surveillance, récupération). Ces fonctions sont similaires aux fonctions considérées dans les installations nucléaires de base classiques.

En **phase après-fermeture**, les fonctions attribuées au stockage sont toutes des fonctions de sûreté. Elles doivent répondre à la fonction externe principale « protéger l'homme et l'environnement de la dispersion des radionucléides » telle que définie dans le guide de sûreté de l'ASN (ASN, 2008), en introduisant les dispositions d'architecture prises pour les accomplir. Elles sont listées ci-après selon la déclinaison en sous-fonctions de sûreté. Au même titre qu'en phase d'exploitation où certaines dispositions de conception sont mises en place pour gérer les risques, en phase après fermeture, certaines dispositions permettent de gérer les incertitudes de connaissance et donc d'asseoir la confiance dans la démonstration. A titre d'exemple, pour la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », la faible solubilité de nombreux radionucléides au sein des alvéoles permet de limiter fortement leur impact. Compte tenu des incertitudes sur ces paramètres, la présence de conteneurs durables pendant la phase thermique est une option prudente.

Les fonctions de sûreté en exploitation et en particulier après fermeture impliquent des exigences sur la construction de l'installation dès son autorisation de création. Le document intitulé « mémoire » décrit les différents essais au CMHM permettant de mettre au point les techniques nécessaires à la construction du futur centre de stockage et répondant aux exigences de sûreté après fermeture. A titre d'exemple, concernant les ouvrages de type « galeries », la première étape de développement (2004-2010) a permis de mettre au point une méthode de creusement adaptée au Laboratoire (utilisation d'un engin mécanique de type brise-roche hydraulique, boulonnage posé à l'avancement associé à la mise en place de béton projeté, pose de cintres métalliques coulissants). Cette méthode a été progressivement améliorée (mise en place d'une contre-voûte dans le radier, confortement du front).La seconde étape de développement (2010-2022) vise à tester des procédés de construction susceptibles d'être mis en œuvre pour construire les premières galeries du stockage[21]. Pour 2015, on s'attachera notamment à évaluer un procédé de construction plus représentatif du stockage (creusement avec une machine à attaque ponctuelle, mise en place d'un revêtement « rigide » et d'un revêtement « souple »). D'autres procédés de construction pourront être testés après 2015. Après la mise en service du stockage, les travaux de creusement et d'équipement des nouveaux ouvrages du stockage se poursuivront parallèlement à l'exploitation du stockage. La réglementation sur les installations nucléaires de base prévoit que l'exploitant procède régulièrement au réexamen de la sûreté de son installation. Ce réexamen tient notamment compte de l'état de l'installation, de l'expérience acquise au cours de l'exploitation, de l'évolution des connaissances et des règles applicables aux installations similaires. Les réexamens de sûreté ont lieu tous les dix ans ; toutefois le décret d'autorisation peut fixer une périodicité différente si les particularités de l'installation le justifient. De la même façon, les modalités de réversibilité pourraient être réévaluées régulièrement.

Après la phase de mise en service et de démarrage de l'exploitation du centre de stockage (2025-2030), il conviendra d'examiner l'intérêt éventuel de poursuivre certains essais dans le Laboratoire, en dehors de l'installation nucléaire de base constituée par le centre de stockage. Le retour d'expérience acquis dans le Laboratoire sur le comportement différé des ouvrages pourra notamment fournir des informations complémentaires au suivi des ouvrages du stockage, en support à sa gestion réversible et aux réexamens de sûreté. Il pourrait ainsi s'avérer intéressant de poursuivre certaines acquisitions de données expérimentales sur le long terme dans le Laboratoire. Le Laboratoire permettrait également de tester certaines évolutions de procédés en souterrain et en inactif ; il offre par exemple la possibilité de qualifier dans l'environnement géologique les dispositifs d'observation et de surveillance avant leur mise en place dans le stockage. L'ensemble des essais fait l'objet du document (Andra, 2009g).

Des dispositions de surveillance sont proposées dans les chapitres 2, 3 et 4 au regard de l'analyse des risques et des incertitudes en exploitation et après fermeture.

[21] La réalisation des galeries souterraines du stockage dans le niveau d'implantation pourrait débuter à l'horizon 2022, après la réalisation des liaisons surface-fond.

1.6.12.1 En phase d'exploitation

En exploitation, les fonctions de sûreté sont valables pour toutes les phases au cours desquelles des personnes sont susceptibles d'être présentes dans le stockage, de manipuler des colis de déchets radioactifs, qu'il s'agisse de les mettre en place, de les surveiller, ou de les retirer pour des besoins de sûreté ou de réversibilité. Il s'agit de :

- confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion. Cette fonction permet également, de fait, de confiner d'éventuels toxiques chimiques,
- protéger les personnes contre l'irradiation,
- assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité, qui est distingué comme un but en soi compte tenu des risques liés à la manipulation d'objets contenant de la matière fissile. On notera cependant que, au sens strict, cette fonction est très similaire dans son objectif à la fonction « protéger les personnes contre l'irradiation » et « confiner la radioactivité »,
- évacuer la puissance thermique résiduelle des déchets, afin de protéger les travailleurs contre les risques liés aux dégagements de chaleur des déchets et assurer une atmosphère de travail satisfaisante ; cette fonction permet aussi de protéger les colis d'une montée en température pouvant dégrader leur propriétés de confinement et altérer les composants du stockage,
- évacuer les gaz de radiolyse, afin de gérer à la fois les risques d'explosion et leur potentielle toxicité.

On notera qu'il s'agit ici de fonctions de sûreté nucléaire. D'autres, liées plutôt aux phases de creusement ou à la prévention et à la gestion des risques du travail classique, sont à ajouter. Le personnel doit notamment être protégé de nuisances liées au contexte minier, ou plus généralement industriel, du stockage : protection contre les poussières, contre les chutes de blocs et les effondrements, contre le risque électrique, par exemple. Les fonctions « support » (alimentation électrique, moyens de manutention…) participent aux fonctions de sûreté. Les conséquences de leur dégradation suite à une agression seront, à ce titre, elles aussi analysées.

Enfin, on note une série d'autres objectifs de protection environnementale, qui ne se rattachent pas directement à la sécurité des travailleurs ou du public :

- la protection des eaux souterraines (dans les horizons aquifères traversés) contre les différentes formes de pollution possibles,
- la protection de l'environnement de surface contre les impacts induits principalement par les travaux de construction, qui durent pendant toute la phase de construction/exploitation du stockage (protection des eaux superficielles, de l'air, des sols, de la faune, de la flore, du voisinage et du paysage).

On notera aussi la protection et le contrôle des matières nucléaires contenues dans l'installation.

Les équipements et systèmes qui contribuent au maintien de ces fonctions peuvent potentiellement être qualifiés d'EIS (éléments importants pour la sûreté) lorsque l'analyse de sûreté montre que leur perte peut conduire à une situation inacceptable pour l'environnement ou les personnes.

Seules les grandes options de sûreté adoptées vis-à-vis des fonctions à accomplir sont citées dans le Tableau 1.6 11 qui suit :

Tableau 1.6-11 Tableau récapitulatif des fonctions et dispositions (en phase d'exploitation)

Fonctions de sûreté	Sous-fonctions	Exigences de conception-construction-exploitation
Protéger les personnes et l'environnement contre la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques	Protéger les personnes et l'environnement contre la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques	• Dispositions de contrôle de propreté radiologique des colis à la réception sur site (soit ≤ 4 Bq.cm^{-2} en émetteurs β,γ et ≤ 0,4 Bq.cm^{-2} en émetteurs α). • Dispositions limitant la contamination surfacique des colis de stockage (soit ≤ 4 Bq.cm^{-2} en émetteurs β,γ et ≤ 0,4 Bq.cm^{-2} en émetteurs α) sur le site. • Dispositifs et zonage de confinement des substances radioactives : ✓ dimensionner le confinement statique et dynamique des installations à l'aide de documents normatifs, ✓ maîtriser tout risque de perte de confinement : – d'origine interne : incendie, criticité, explosion, perte de ventilation, chute, collision,… – d'origine externe : séisme, chute d'avion, environnement industriel, inondation, … ✓ maîtriser la dissémination de gaz radioactifs et toxiques et les canaliser vers des exutoires, ✓ maîtriser la venue d'eau sur les colis. • Dispositifs de surveillance et de traitement le cas échéant : ✓ maîtriser les niveaux de contamination des colis et des installations du stockage, ✓ maîtriser les rejets solides, liquides et gazeux.
Protéger les personnes contre l'irradiation	Protéger les travailleurs des rayonnements ionisants émis par les substances radioactives	• Dispositifs et zonage de radioprotection limitant l'exposition des travailleurs selon le principe ALARA : ✓ dimensionner les écrans de protection radiologique, ✓ éloigner les personnes des sources radioactives (en utilisant par exemple des équipements télé-opérés), ✓ limiter le temps de présence pour les postes les plus dosants, ✓ signaler les zones à risques conformément à la réglementation, ✓ maîtriser tout risque de perte des écrans, et les risques liés aux facteurs humains et organisationnels. • Dispositifs de surveillance : ✓ maîtriser les expositions des travailleurs.
	Protéger le public des rayonnements ionisants émis par les substances radioactives	• Dispositifs de radioprotection limitant l'exposition du public selon le principe ALARA : ✓ limiter le débit de dose à la clôture, limiter les effets de ciel, notamment dimensionner les bâtiments (ou mettre des compléments éventuels – buttes), ✓ éloigner les personnes des sources radioactives (distance à la clôture), ✓ signaler la présence de l'INB, ✓ maîtriser les risques liés aux événements externes, liés au vieillissement des bâtiments. • Dispositifs de surveillance : ✓ mesurer les débits de dose à la clôture, ✓ mettre en place des servitudes.

Fonctions de sûreté	Sous-fonctions	Exigences de conception-construction-exploitation
Rester sous critique	Contrôler la masse de matière fissile	• Dispositifs de limitation de la masse admissible de matières fissiles : ✓ connaître la quantité de matières fissiles par colis primaires, ✓ maîtriser la répartition des colis primaires dans le colis de stockage pour respecter la masse admissible, ✓ maîtriser la répartition des colis de stockage contenant des matières fissiles dans l'alvéole. • Dispositifs de surveillance : ✓ vérifier, par sondage, la fiabilité des déclarations des producteurs de la masse de matières fissiles par colis primaire, ✓ tracer la localisation des colis de stockage dans les installations du stockage.
	Contrôler l'environnement de la matière fissile	• Dispositifs de contrôles complémentaires au contrôle par la masse : ✓ concevoir et dimensionner les colis de stockage (exemple : géométrie, agencement) et les installations (nature des matériaux). • Dispositifs de maintien de la sous criticité : ✓ maîtriser les risques d'évolution de l'environnement (géométrie, matériau, densité...) de la matière fissile retenue en situation incidentelle (tenue au séisme, inondation, ...). • Dispositifs de surveillance : ✓ contrôler le dimensionnement des colis et des installations, ✓ surveiller l'évolution des géométries et durant la phase d'exploitation.
Evacuer la puissance thermique des déchets		• Dispositifs d'évacuation de la chaleur : ✓ concevoir un système de ventilation permettant de : o conserver des températures assurant la sécurité du personnel (température inférieure à 60 °C pour les parois chaudes accessibles aux personnes, température ambiante compatibles avec la présence des personnes, le cas échéant en limitant le temps de présence), o maintenir une température ambiante compatible avec le bon fonctionnement des équipements. • Dispositifs de surveillance : ✓ contrôler la température ambiante.
Evacuer les gaz de radiolyse		• Dispositifs de maîtrise du risque d'explosion lié à la formation de gaz : ✓ limiter la concentration en gaz explosifs à 25 % de la limite inférieure d'explosivité (LIE) pour l'ensemble des locaux de l'installation et à 10 % de la LIE pour les locaux dans lesquels des personnes travaillent, ✓ dimensionner le colis de stockage, ✓ dimensionner la ventilation pour homogénéiser et évacuer les gaz explosifs. • Dispositifs de surveillance ✓ vérifier l'efficacité de la ventilation pour homogénéiser et évacuer les gaz explosifs.

1.6.12.2 En phase après-fermeture

En phase après-fermeture, les fonctions attribuées au stockage sont des fonctions de sûreté qui répondent à la fonction externe principale « protéger l'homme et l'environnement de la dispersion des radionucléides ». Au même titre qu'en phase d'exploitation où certaines dispositions de conception sont mises en place pour gérer les risques, en phase après fermeture, certaines dispositions permettent de gérer les incertitudes de connaissance et donc d'asseoir la confiance dans la démonstration. A titre d'exemple, pour la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », la faible solubilité de nombreux radionucléides au sein des alvéoles permet de limiter fortement leur impact. Compte tenu des incertitudes sur ces paramètres, la présence de conteneurs durables pendant la phase thermique est une option prudente.

Le Tableau 1.6-12 ci-après synthétise les fonctions à assurer et les recommandations en terme de dispositions à prendre notamment pour la conception et l'implantation.

Tableau 1.6-12 Tableau récapitulatif des fonctions et dispositions (en phase après fermeture)

Fonctions de sûreté	Sous-fonctions	Exigences de choix de site, conception, exploitation, après fermeture
Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines		• Choix de site et de conception pour mettre les déchets hors d'atteinte des phénomènes d'érosion et des intrusions humaines banales : ✓implanter le stockage à une profondeur: P > 200 m (exigence du Guide de sûreté ASN 2008), ✓absence de ressources souterraines exceptionnelles extractibles susceptibles de susciter des travaux de prospection, ✓limiter les quantités utilisées de matériaux dans les composants manufacturés à des niveaux ne permettant pas le développement de ressources économiques exceptionnelles à long terme. • Conception de l'architecture pour limiter les conséquences d'une éventuelle intrusion suite à une perte de contrôle institutionnel de surveillance : ✓fractionner le stockage et mettre en place des scellements (exemple : un scellement tous les dix modules). • Surveillance après fermeture : ✓maintenir le plus longtemps possible la mémoire du stockage et a minima sur une durée 500 ans, ✓mettre en place des servitudes pour éviter les forages et contrôler les usages futurs du site.
S'opposer à la circulation d'eau	Limiter le débit d'eau provenant des formations géologiques sus-jacentes, traversées par les ouvrages d'accès = Limiter les flux d'eau susceptibles d'être drainés dans les formations sus jacentes	• Implanter le stockage à distance de voies privilégiées de circulation d'eau. • Conception de l'architecture et des scellements pour limiter les débits d'eau au droit d'aquifères plus perméables traversés par les ouvrages de liaisons surface-fond : ✓limiter les connexions hydrauliques entre les aquifères plus perméables et les argilites : mise en place d'un « dispositif de séparation des aquifères plus perméables » (répond également à des exigences de la loi sur l'eau), ✓mettre en place des « scellements isolant le stockage » au toit des argilites, ✓limiter la différence de charge entre les différents ouvrages de liaison surface fond, pour limiter les circulations en U entre ces ouvrages via le stockage : vérifier le caractère négligeable des débits de RN dus aux circulations en U possibles devant ceux provenant des argilites préalablement à l'implantation des ouvrages de liaisons surface-fond.

Fonctions de sûreté	Sous-fonctions	Exigences de choix de site, conception, exploitation, après fermeture
	Limiter le débit d'eau dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien = Limiter les flux d'eau susceptibles d'être drainés dans la formation hôte	• Localisation du stockage dans une zone peu perméable où le gradient de charge hydraulique est inférieur à 0,2 m/m (Cf. Figure 2-2 de la note ZIIS-ZIRA ; CRDP.ADP.09.003).
	Limiter les flux d'eau dans les ouvrages du stockage 1. Limiter les flux d'eau effectivement captés par l'ensemble du stockage (par rapport à ceux susceptibles d'être captés dans les formations sus jacentes et dans la formation hôte)	• Conception de l'architecture et des éléments ouvragés pour préserver les propriétés hydrauliques de la formation hôte des effets thermiques, mécaniques, hydrauliques et chimiques : ✓limiter les sollicitations thermiques : limiter la densité de stockage et réduire le potentiel thermique avant mise en stockage, ✓limiter les sollicitations mécaniques en minimisant les vides résiduels. Prendre des dispositions de conception, notamment : largeurs de piliers entre ouvrages (≥ 5 fois le diamètre excavé pour les alvéoles MAVL, ≥ 4 fois pour les galeries), dispositions de soutènement-revêtement, ✓limiter l'extension de l'endommagement : maîtriser des techniques de creusement et orienter si nécessaire les alvéoles pour limiter l'endommagement, ✓limiter la pression due aux gaz produits à un niveau inférieur à la pression d'entrée de gaz dans l'argilite (limiter les surfaces métalliques accessibles à l'eau). • Conception des scellements et de l'architecture de stockage : ✓mettre en place des scellements de perméabilité équivalente la plus faible possible (performance requise à optimiser le cas échéant au vu des calculs de sûreté), notamment en maîtrisant l'endommagement de la roche, ✓concevoir une architecture limitant la présence et la formation de circulations d'eau dans les ouvrages, ✓limiter autant que possible les sections excavées des galeries (et des scellements) pour limiter les flux d'eau. • Construction : ✓mettre en œuvre des techniques de creusement-soutènement-revêtement visant à limiter l'endommagement (importance et extension spatiale) et à préserver la faible perméabilité de l'argilite, ✓orienter si nécessaire les scellements pour limiter l'endommagement à un niveau compatible avec la faible perméabilité équivalente acceptée au vu des calculs de sûreté.
	2. Limiter les flux d'eau dans les alvéoles HA et CU3	• Conception des alvéoles HA : ✓concevoir les alvéoles HA borgnes, ✓mettre en place un bouchon.
	3. Limiter les flux d'eau dans les alvéoles MAVL	• Conception de la zone MAVL et de l'architecture : ✓mettre en place des scellements d'alvéoles de faible perméabilité équivalente, ✓minimiser les vides dans l'alvéole.
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	***Tous colis***	• Conception de l'architecture de stockage : ✓séparer physiquement les alvéoles selon leur nature physico-chimique de déchets, par stockage dans des zones ou modules distincts avec une distance entre zones et modules permettant l'indépendance phénoménologique.
	Protéger les déchets HA de l'eau HA vitrifiés : Empêcher l'arrivée d'eau sur le verre pendant la phase thermique (i.e. tant que la température du verre	• Conception du colis de stockage et du chemisage : ✓choisir une nuance d'acier et épaisseur favorables à l'étanchéité du surconteneur sur une durée pluriséculaire à millénaire, ✓assurer la tenue mécanique du chemisage pendant la phase thermique, pour maîtriser les sollicitations mécaniques du surconteneur (éviter ainsi des chargements ponctuels peu prédictibles et des points de contacts susceptibles de favoriser

Fonctions de sûreté	Sous-fonctions	Exigences de choix de site, conception, exploitation, après fermeture
	excède 50 °C) CU3 : Interdire l'arrivée d'eau sur la matrice métallique pendant la phase thermique (i.e. tant que sa température excède 50 °C) *Justification du critère de 50 °C : la connaissance du comportement des radionucléides en solution est maîtrisé jusqu'à cette valeur*	une corrosion localisée), ✓assurer la tenue du surconteneur aux sollicitations mécaniques sous chargement hydrostatique et avec un dimensionnement à la corrosion tenant compte de la période oxydante que l'on cherche par ailleurs à limiter, de la corrosion uniforme en conditions anoxiques, de l'influence de la radiolyse et des dispositions suivantes prises pour limiter/ rendre prédictible la corrosion, ✓mettre en place des dispositifs évitant les contacts directs chemisage / surconteneur qui créeraient des zones confinées favorables à la corrosion localisée (solution étudiée : les patins en céramique). • Conditions d'exploitation : ✓limiter la période oxydante (limiter les échanges gazeux avec la galerie avant la mise en place du bouchon et de son appui en béton).
	Limiter la mise en solution des radionucléides des déchets HA	• Conception des matériaux manufacturés et de l'architecture : ✓assurer des conditions d'environnement favorables (température ≤ 50°C, 7 ≤ pH ≤ 9 (critère dépendant du modèle de comportement du verre ; cela limite l'emploi de matériaux cimentaires au voisinage immédiat des déchets), environnement chimique réducteur, environnement physique peu perméable et peu diffusif, ✓limiter les vides dans l'alvéole et l'endommagement de l'argilite en champ proche. • Pendant le creusement : ✓maîtriser les techniques de creusement et orienter si nécessaire les alvéoles pour limiter l'endommagement à un niveau compatible avec la faible perméabilité équivalente acceptée au vu des calculs de sûreté. • Pendant l'exploitation : ✓limiter les chocs pour conserver le taux de fracturation aussi proche que possible du taux initial lié au procédé de production du colis primaire.
	Limiter la mise en solution des radionucléides des combustibles usés CU3	Mêmes exigences que pour les colis HA vitrifiés, à l'exception du critère pH élargi à 7 ≤ pH ≤ 10 (critère dépendant du modèle de dissolution du métal) et à l'exception du critère de taux de fracturation du verre.
	Limiter la mise en solution des radionucléides des déchets MAVL Dans les alvéoles de déchets MAVL	• Choix du site et des matériaux d'apport : ✓limiter les interactions chimiques roche – matériaux rapportés (installation et colis) perturbant l'argilite. • Conception de l'architecture : ✓séparer des déchets (maintenir une garde suffisante entre zones ou alvéoles contenant les colis organiques et non organiques), ✓favoriser la stabilité dimensionnelle (minimiser les vides).
	Limiter la mobilité des radionucléides relâchés *(au sens de limiter ce qui pourrait accroître leur mobilité, comme les complexants, l'action des colloïdes …)*	• Choix d'architecture pour préserver les propriétés de faibles solubilités et sorptions : ✓minimiser le contenu en matières organiques des constituants du stockage et en espèces agressives dans les constituants du stockage, ✓séparer en modules distincts HA/MAVL et, au sein des MAVL, des déchets contenant ou non de la matière organique (susceptible de se dégrader en complexants mobilisateurs), des déchets (présence de sels de nitrate notamment) susceptibles de générer des perturbations (condition oxydante, complexation...). • Conception des matériaux manufacturés : ✓limiter l'action le transport des colloïdes et des complexants : fermer les alvéoles par un dispositif de faible perméabilité (bouchon d'argile et interruption de la zone endommagée d'argilite).

Fonctions de sûreté	Sous-fonctions	Exigences de choix de site, conception, exploitation, après fermeture
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Retarder et atténuer le flux longitudinal de radionucléides relâchés dans les ouvrages	• Conception d'architecture et matériaux manufacturés : ✓Privilégier le flux massique de radionucléides par les galeries le plus faible possible par rapport au flux par l'argilite, ✓maintenir une domination du transport diffusif dans les ouvrages, ✓privilégier la capacité de dispersion du remblai, ✓concevoir des longueurs de galeries suffisantes pour que, par dispersion dans le remblai, les radionucléides aient le temps de gagner l'argilite et d'y diffuser.
	Retarder et atténuer la migration des radionucléides dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien	• Implantation du stockage : ✓préserver une épaisseur de garde d'argilite peu ou non perturbée la plus grande possible et répartie au dessus/au dessous pour la robustesse (garde entre alvéoles de stockage et formations encaissantes ≥ 60m, épaisseur de formation hôte > 130m). • Conception des composants manufacturés pour préserver la capacité de sorption et rétention des argilites : ✓ choisir des matériaux pour préserver les caractéristiques physico-chimiques favorables de la formation hôte (milieu, réduit, sorbant, pH). • Conception de l'architecture du stockage : ✓choisir une densité de répartition des colis exothermiques pour limiter les sollicitations thermiques de la formation hôte (T< 90°C dans argilite).
Rester sous critique		• Conception de l'architecture du stockage : ✓limiter la migration et la formation de zones de reconcentration de la matière fissiles notamment en minimisant les vides dans les alvéoles, ✓optimiser la répartition des colis dans les alvéoles. • Conception des colis de stockage : ✓limiter la masse de matière fissile par colis de stockage.

2

Options de sûreté des installations de surface

2.1	*Préambule*	*94*
2.2	*Présentation des installations et de leur environnement*	*94*
2.3	*Maitrise des risques*	*123*
2.4	*Situations de dimensionnement*	*157*
2.5	*Dispositions adoptées en vue du démantèlement*	*159*
2.6	*Gestion des déchets et des effluents*	*159*

2.1 Préambule

Comme pour toute installation industrielle, les différentes activités en surface liées au stockage en formation géologique profonde des déchets HA et MAVL (construction, exploitation, démantèlement) peuvent induire des risques pour les personnes, le public ou l'environnement.

Ce chapitre présente l'état actuel des connaissances sur l'implantation et la conception des futures installations de surface du centre de stockage. Il a pour objectif de restituer les premières options de sûreté retenues, nécessaires à la maîtrise des risques d'origines interne ou externe, pouvant conduire à des conséquences nucléaires ou sanitaires.

La démarche de sûreté mise en œuvre pour la conception des installations de surface du centre de stockage repose sur l'application des principes présentés au chapitre 1, notamment le principe de défense en profondeur, soit l'interposition de barrières entre les produits radioactifs et le personnel, le public et l'environnement en prenant en compte l'éventualité de défaillances techniques et humaines et la mise en place de lignes de défense pour y faire face et en limiter les conséquences.

Ce chapitre présente les dispositions de conception et d'exploitation retenues au stade actuel du projet pour maîtriser les risques en conformité avec les fonctions de sûreté identifiées associées, en fonctionnement normal et incidentel/accidentel.

Enfin les scénarios de dimensionnement et hors dimensionnement pressentis à ce stade des études sont répertoriés, ainsi que les principales dispositions adoptées pour le démantèlement des installations et la gestion des déchets induits par l'exploitation des installations.

2.2 Présentation des installations et de leur environnement

2.2.1 Environnement du site

Dans le cadre du Dossier 2005, l'Andra a défini les contours d'une zone dite de transposition, située en Meuse/Haute-Marne, au sein de laquelle l'implantation du stockage des déchets radioactifs HA et MAVL en couche géologique profonde était possible.

Le centre de stockage sera constitué d'installations en surface et en souterrain, reliées par des ouvrages de liaison. Ces ouvrages qui peuvent être des puits verticaux ou des descenderies (galeries inclinées), sont des ouvrages usuels en souterrain.

Au stade de l'étude de faisabilité (Dossier 2005), il avait été examiné en référence l'utilisation de puits verticaux pour gérer les différents flux entre la surface et les installations souterraines (air, colis, déblais, personnel). Cette solution technique conduit nécessairement à implanter les installations de surface associées à l'aplomb des installations souterraines.

Il est actuellement envisagé la possibilité de découpler une partie des installations de surface des installations souterraines au moyen d'une descenderie déroulée. La flexibilité d'implantation offerte par une descenderie conduit à définir un périmètre élargi pour l'implantation possible des installations de surface qui comprend la zone de transposition (dans laquelle les installations souterraines seront positionnées) et l'extension possible des ouvrages de liaison de type descenderie à partir des installations souterraines.

La zone d'étude retenue en 2009 correspond à la zone de transposition, complétée par une bande d'environ 5 km (correspondant au choix d'une descenderie avec une pente de l'ordre de 10 %) autour de cette zone (sauf dans la partie Est limitée par le fossé de Gondrecourt pour éviter de traverser avec la descenderie les zones de fracturation connues). Cette zone, correspondant au périmètre d'implantation possible des installations de surface, est représentée sur la Figure 2.2-1 ci-dessous.

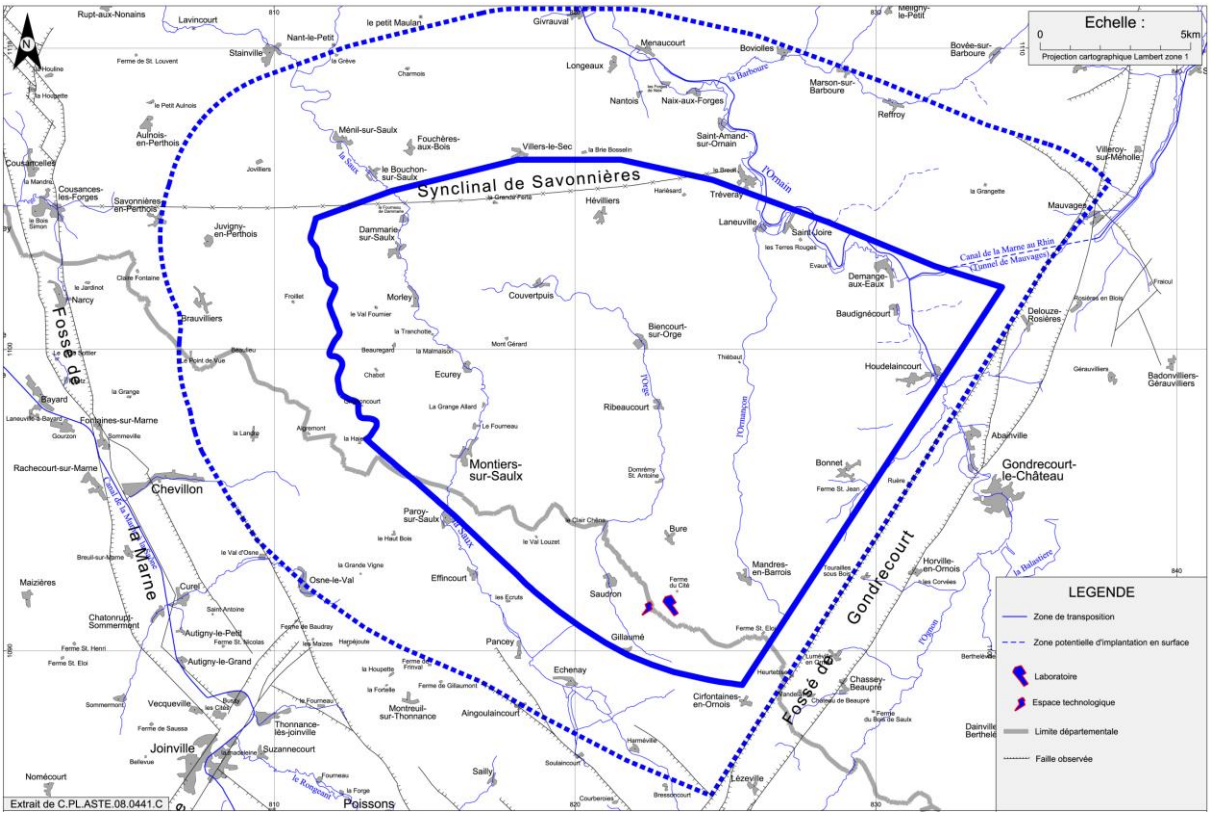


Figure 2.2-1 Périmètre d'implantation possible des installations de surface

Les caractéristiques du site qui peuvent influer sur la sûreté de l'installation sont principalement les agressions externes d'origine naturelle (séisme, conditions climatiques extrêmes, foudre, inondation externe, incendie externe) et humaine (chute d'avions, environnements industriels et voies de communication). Elles sont évaluées au § 2.3.3 en termes de contraintes potentielles sur l'implantation et sur le dimensionnement des installations, notamment pour les bâtiments/locaux contenant, soit des substances radioactives, soit des équipements assurant des fonctions de sûreté.

2.2.1.1 Le climat

Par leur orientation Nord-Sud et leur altitude (supérieure à 300 mètres), les côtes de Meuse forment un premier barrage aux masses d'air provenant de l'Ouest et du Sud-ouest (vents dominants) et ayant traversé le bassin parisien. Le Barrois se situe dans la zone de transition entre le climat à tendance océanique du Bassin Parisien et l'influence continentale de l'Est de la France. Le climat est dit de type « océanique tempéré à tendance continentale ».

Il est caractérisé par un affaiblissement de l'influence des masses d'air atlantiques et par l'alternance saisonnière de courants froids en provenance d'Europe du Nord l'hiver et de courants d'origine méridionale l'été. Ces phénomènes se traduisent par une répartition régulière des précipitations au cours de l'année, avec des étés orageux, par une amplitude thermique saisonnière de 20°C, et des hivers froids (température minimale mensuelle négative pendant 3 mois). Les températures moyennes annuelles oscillent autour de 10°C. La moyenne interannuelle des précipitations varie de 850 à 1100 mm/an selon la position topographique : le plateau est plus arrosé que les vallées.

Les températures extrêmes à prendre en compte pour le dimensionnement des installations de surface du projet du centre de stockage sont du même ordre de grandeur sur l'ensemble de la zone étudiée (cf. § 2.3.3.4) et ne sont donc pas discriminantes pour l'implantation des installations.

Les installations de surface seront protégées contres les effets directs et indirects de la foudre, conformément aux dispositions réglementaires et selon les normes applicables. L'analyse dans la région Meuse/Haute-Marne du risque de foudroiement (cf. § 2.3.3.4) montre que les densités de foudre sont du même ordre de grandeur et proches de la moyenne nationale, qui est de 1,84 impact

par kilomètre carré et par an. Ce critère n'est pas discriminant pour l'implantation des installations au sein de la zone étudiée.

2.2.1.2 L'hydrologie de surface

On distingue deux domaines de caractéristiques hydrologiques légèrement différentes sur le secteur d'étude.

Le plateau du Barrois est drainé essentiellement par la Saulx et ses tributaires, suivant une direction générale Sud-est/Nord-ouest. Leurs vallées sont étroites et encaissées. Elles forment des méandres dont la géométrie varie avec la topographie. Lorsque les fonds de vallée entaillent la partie supérieure des Calcaires du Barrois, les karsts des calcaires du Barrois donnent des sources, aux débits fortement influencés par les précipitations, mais pouvant atteindre plusieurs m^3/min. Ils sont aussi la cause de pertes sur le cours de certaines rivières (l'Orge en aval de Saudron et de Couvertpuis, la Saulx au Nord du secteur). Dans la partie inférieure, où les karsts sont absents, les débits des rares sources sont très faibles (quelques dizaines de l/min au maximum) et intermittents. Ces cours d'eau sont essentiellement alimentés par une pluviométrie importante (supérieure à 1000 mm/an), d'où une lame ruisselée moyenne annuelle d'environ 500 mm. Les vallées sont inondées de manière saisonnière, durant les mois les plus arrosés.

Le reste du secteur comprend au Nord, le bassin supérieur de l'Ornain, avec deux affluents drainant le revers de la côte de Meuse et, à l'Ouest, la vallée de la Marne, aux reliefs très accentués, qui collecte de nombreux affluents de part et d'autre. La plupart des cours d'eau ont des vallées relativement encaissées. Ils sont alimentés par une pluviométrie moins intense (environ 850 mm/an), d'où une lame ruisselée moyenne annuelle d'environ 400 mm.

L'étude des caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude (cf. § 2.3.3.5) a permis de distinguer deux types de zones d'implantation pour lesquelles le dimensionnement des installations serait contraignant. Il s'agit des zones de forte pente, qui sont en cas de pluie sous influence des bassins versants, les fonds de vallées et les zones inondables (cf. Figure 2.3-5). L'implantation des installations en dehors de ces zones sera privilégiée.

2.2.1.3 L'environnement naturel

Le climat et les sols sont favorables à un fort potentiel végétal et à une bonne productivité des cultures. Les fonds de vallées sont occupés par des prairies humides ou non selon le sol. Sur les plateaux et les versants, les espaces agricoles remplacent progressivement, depuis les derniers millénaires, la forêt tempérée mixte (feuillus et conifères) qui, bien qu'existant encore sur de grandes surfaces (forêt de Montiers notamment), se présente le plus souvent sous forme de petits massifs boisés. Des dispositions classiques vis-à-vis du risque d'incendie externe, comme la définition d'un périmètre de sécurité autour des installations seront prises en compte à la conception (cf. § 2.3.3.6).

Situé à l'écart des régions tectoniquement actives, le bassin de Paris est resté particulièrement peu affecté par la tectonique au cours des dernières 65 millions d'années. C'est une zone remarquable de la plaque ouest européenne, où la lithosphère présente une épaisseur uniforme stable et qui se distingue par son caractère pratiquement asismique. Les données de sismicité disponibles confirment que la région est peu sismogène. Pour le dimensionnement des installations dans les régions à faible sismicité, la Règle fondamentale de Sûreté (RFS n° 2001-01) impose d'appliquer un spectre minimal forfaitaire ou un modèle local, si ce dernier est plus pénalisant. Ce spectre forfaitaire s'applique sur le secteur d'étude, excepté sur la bordure sud-est et localement en bordure sud-ouest où le dimensionnement serait réalisé sur la base d'un modèle sismotectonique par failles, plus pénalisant (cf. § 2.3.3.1 et Figure 2.3-1). Seuls certains locaux (ou ensembles de locaux) de l'installation nucléaire de base seront dimensionnés pour résister au séisme majoré de sécurité ainsi défini ; ce sont ceux qui assurent ou concourent au maintien d'une fonction de sûreté (cf. § 1.6.12 du Chapitre 1).

2.2.1.4 L'environnement humain

L'habitat est essentiellement constitué de villages et hameaux dans les vallées, près des ressources en eau. Seules quelques fermes sont isolées sur les plateaux. L'activité principale du secteur est l'agriculture, centrée sur la production de céréales et d'oléagineux et l'élevage bovin. La présence de

surfaces boisées permet également la sylviculture. Ces activités sont complétées par l'entretien de jardins potagers d'appoint et les pratiques de la cueillette, de la chasse et de la pêche.

Quelques agglomérations plus importantes (Joinville, Gondrecourt-le-Château et Montiers-sur-Saulx) concentrent la quasi-totalité des activités de service ainsi que les activités industrielles (forges, industries alimentaires).

Quelques installations comme les installations de l'Andra (le Centre de Meuse Haute-Marne comprenant notamment le laboratoire souterrain et l'espace technologique), le parc éolien et le centre d'archivage d'Electricité de France sont situés sur la zone de transposition élargie.

Un gazoduc est situé à l'extrémité Nord-Est de la zone de transposition. Deux lignes électriques de haute tension traversent cette zone et contraignent également l'implantation des installations de surface (cf. Figure 2.3-6). Les risques liés aux voies de communication (voies routières structurantes, voies ferrées et canal de la Marne au Rhin) peuvent induire des spécifications particulières pour le dimensionnement des bâtiments (cf. § 2.3.3.6). Ces risques seront considérés plus précisément dans les futures études détaillées au regard du site d'implantation retenu.

Six aérodromes sont implantés actuellement dans un rayon de 50 km autour de la zone de transposition qui est également traversée par un couloir aérien et se trouve sous plusieurs zones militaires réglementées. L'activité aérienne à proximité du site ne peut pas donc être négligée. L'analyse menée au § 2.3.3.2 montre que deux sous-zones peuvent contraindre le dimensionnement des installations de surface (cf. Figure 2.3-2). L'implantation des installations en dehors sur ces deux sous-zones d'activité aérienne sera privilégiée.

2.2.2 Implantation des installations de surface

L'analyse des contraintes liées à la sûreté (présentées au § 2.2.1) sur la zone de transposition élargie au périmètre de l'entrée de la descenderie du centre de stockage a conduit à considérer certaines zones comme moins favorables pour implanter les installations de surface. Les contraintes de sûreté à l'intérieur de la zone de transposition élargie sont récapitulées sur la Figure 2.2-2.

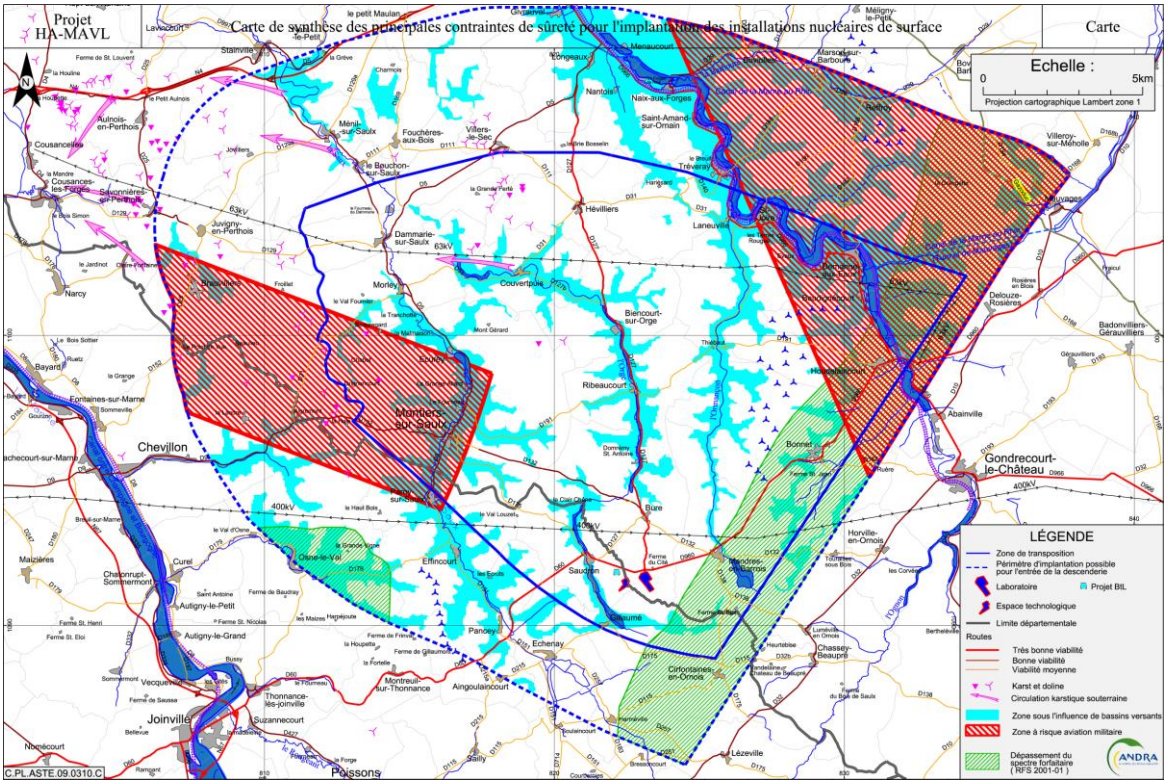


Figure 2.2-2 *Carte de synthèse des principales contraintes de sûreté pour implanter les installations nucléaires de surface*

Une fois le site d'implantation retenu, le dimensionnement des installations de surface du centre de stockage lié à leur environnement pourra être défini plus précisément.

Ces installations de surface du centre de stockage sont directement liées à la conception des installations souterraines du stockage qui comprennent deux entités :

- la première correspond à l'ensemble des infrastructures et des alvéoles de stockage creusées au sein de la formation argileuse du Callovo Oxfordien qui sont nécessaires au stockage des déchets,
- la deuxième est constituée par les ouvrages de liaison entre la surface et les installations souterraines du stockage. Ces ouvrages comprennent deux types d'ouvrage : les puits et les galeries inclinées (descenderies). Les puits, situés à l'aplomb des ouvrages souterrains, comprendront des puits de ventilation, un puits d'extraction des déblais et de transfert du matériel et un puits d'accès pour le personnel. Les descenderies comprendront une descenderie dédiée au transfert des colis de stockage ainsi qu'une descenderie de service permettant l'accès des personnes et des équipements.

Les installations de surface du centre de stockage seront donc dissociées en deux zones distinctes en surface (cf. Figure 2.2-3) :

- la première zone, dite « puits », située à l'aplomb des installations souterraines, pourra assurer l'extraction des déblais et accueillir la verse lors des opérations de creusement. Cette zone est essentiellement non nucléaire, à l'exception des installations liées aux puits de ventilation de retour d'air, avec les superstructures des puits de ventilation et les bâtiments techniques associés ;
- la seconde zone, dite « descenderie «, séparée géographiquement de quelques kilomètres sera destinée à la réception des colis de déchets, à leur conditionnement, leur entreposage temporaire et leur expédition vers les installations souterraines.

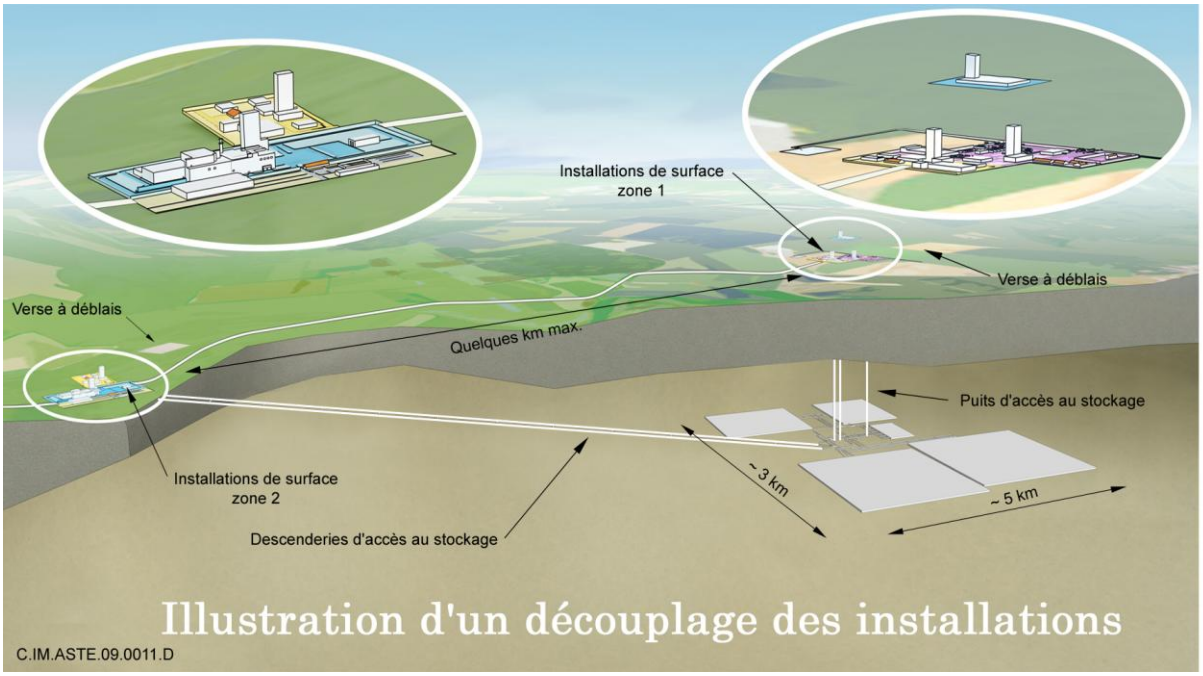


Figure 2.2-3 Illustration d'un découplage des installations du centre de stockage

Les installations nucléaires de surface telles que présentées au stade du Jalon 2009 sont définies à partir d'esquisses de chroniques de livraison (Andra, 2009a). Etant donné la grande diversité des colis de déchets destinés au stockage en profondeur d'une part et les échéances de production de ces déchets étalées dans le temps d'autre part, l'architecture des installations de surface est prévue pour être évolutive. Par ailleurs, cette architecture dépend du site sur lequel elles seront implantées à terme, en particulier les conditions d'environnement.

Les éléments et les figures des installations présentées dans le présent document constituent donc une illustration qui ne tient pas compte des contraintes environnementales (contraintes topographiques, écoulement des eaux, choix architectural,...) compte tenu du choix encore ouvert pour l'implantation du site (Andra, 2009f).

2.2.2.1 Installations de la zone « puits »

Les installations de la zone « puits » comprennent les puits de ventilation de retour d'air des installations souterraines, avec les bâtiments techniques associés (ventilation, contrôle de l'air, alimentation électrique). Elles sont dotées d'une cheminée pour les rejets gazeux et de dispositifs de contrôles et de filtration, si nécessaire[22] (cf. Chapitre 3).

Elles sont également liées aux fonctions du puits d'« extraction des déblais » et du puits « personnel ». Elles sont principalement constituées des superstructures des puits avec l'ensemble des bâtiments techniques associés, de la verse de dépôt des matériaux extraits, des installations techniques nécessaires au fonctionnement et à l'approvisionnement du stockage (transformateurs électrique, centrale à béton, ateliers, magasins...), et des installations liées au contrôle des eaux et à la surveillance de l'environnement (bassins de décantation et unité de traitement des eaux d'exhaure, bassin d'orage,...).

L'emprise des installations de la zone « puits » est estimée à ce stade des études à environ 200 ha, dont 130 ha réservés à la verse de déblais. Le schéma d'implantation possible de ces installations est présenté sur la Figure 2.2-4.

[22] La descenderie utilisée pour le transfert de colis pourrait, le cas échéant, nécessiter une unité de filtration, qui serait localisée en souterrain ou au niveau du puits de retour d'air. En ce qui concerne certaines alvéoles MAVL qui pourraient aussi être concernées, la localisation de l'unité de filtration au plus près de la source potentielle en extrémité d'alvéole de stockage serait privilégiée, plutôt qu'en tête de puits.

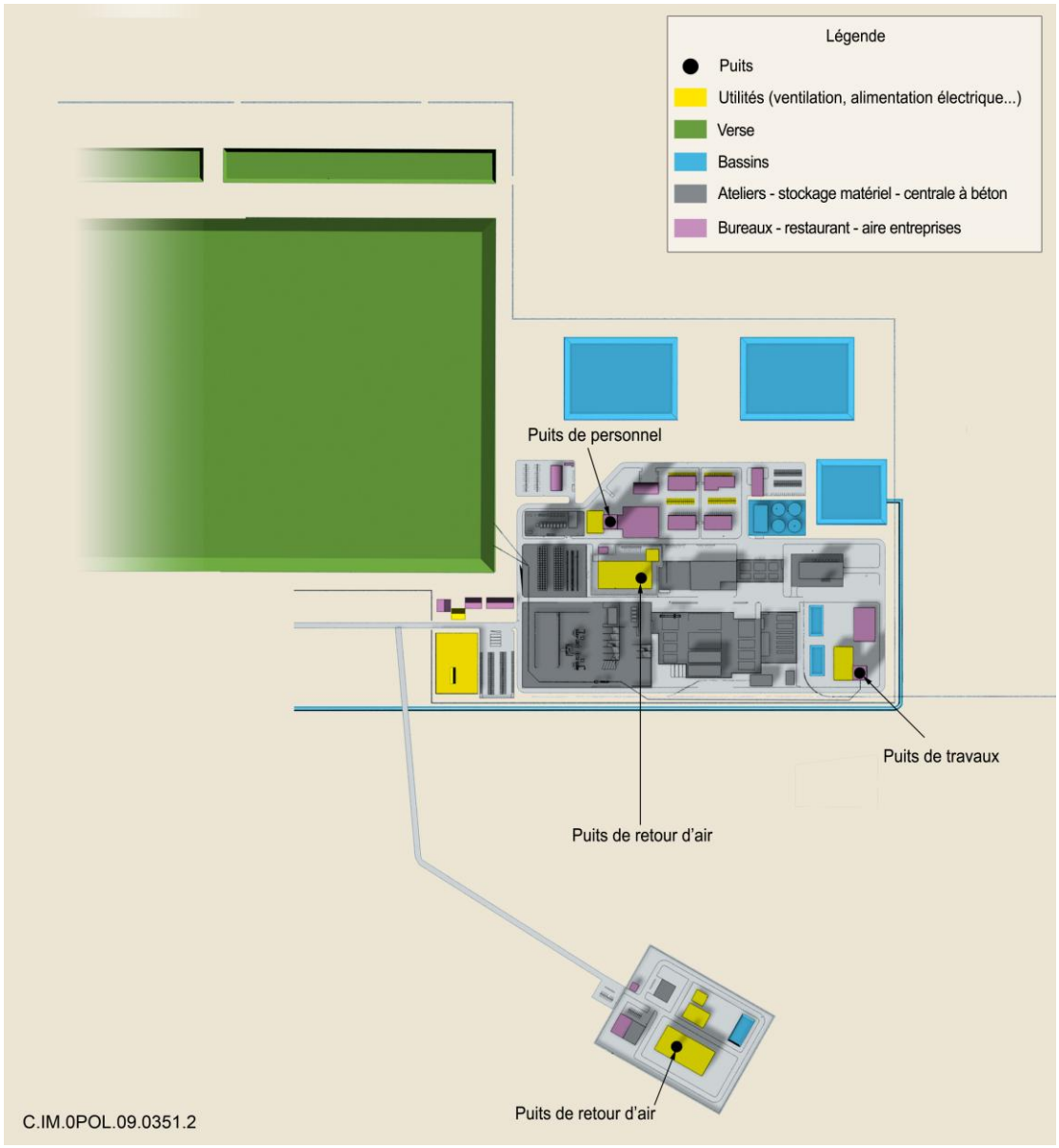


Figure 2.2-4 Schéma des installations de surface de la zone « puits »

2.2.2.2 Installations de la zone « descenderie »

Ces installations comprendront notamment :

- des bâtiments techniques associés à la descenderie (ventilation, alimentation électrique…),
- des zones d'interface nécessaires pour l'approvisionnement du matériel,
- des installations techniques nécessaires au fonctionnement et à l'approvisionnement des installations nucléaires de surface (transformateurs électrique, ateliers, magasins…),
- des bâtiments supports à usage du personnel (bureaux, infirmerie…),
- des installations liées au contrôle des eaux et à la surveillance de l'environnement (bassins de décantation et unité de traitement des eaux d'exhaure, station d'épuration des eaux usées, bassin d'orage…)
- des verses des déblais des travaux de creusement de la descenderie,
- des aires de dépôts d'équipements et de matériels, les voiries.

L'autre partie des installations de cette zone « descenderie » sera liée aux unités de réception des colis, de conditionnement des colis primaires en colis de stockage et de transfert des colis de stockage vers les installations souterraines. Ces installations, dites « installations nucléaires », comprendront :

- un terminal ferroviaire pour la réception des emballages de transport de colis de déchets. L'acheminement des colis depuis les sites producteurs jusqu'au centre de stockage (ou à proximité) par voie ferrée est, au stade actuel, pris comme référence par rapport au transport routier. Le transport par voie ferrée permet de minimiser le bilan carbone lié aux transports et est plus efficace lorsque les flux de transport sont élevés car plusieurs emballages de transport peuvent être pris en charge par le même convoi ferroviaire (train dédié)[23] ;
- des installations dédiées à la réception et au déchargement des emballages de transports, à la préparation et au conditionnement des colis primaires en colis de stockage, au transit des colis de stockage conditionnés sur site ou pour d'autres besoins spécifiques, à l'entreposage des hottes de transfert et aux salles de conduites des procédés. Ces installations seraient regroupées au sein d'un même bâtiment en concevant l'agencement interne de manière à optimiser le zonage radiologique des installations nucléaires et la protection des personnes. De même, ce bâtiment comprendra l'accès aux ouvrages de liaison surface-fond dans lesquels s'effectueront le transfert des colis vers les installations souterraines pour éviter toute circulation en plein air dans un environnement non protégé ;
- des installations techniques support (alimentations électriques, systèmes de ventilation, ateliers, magasins…) ;
- des installations de contrôle des eaux et de surveillance de l'environnement (bassins de rétention, unités de traitement des eaux…) ;
- des aires de dépôts d'équipement et de matériels, les voiries.

La zone nucléaire réglementée, siège du procédé de prise en charge des colis de déchets (réception, déchargement et conditionnement des colis primaires, entreposage de transit et mise en hotte des colis de stockage), sera située au sein de la zone nucléaire non réglementée qui comprendra les installations techniques support, les installations de contrôle et les aires de dépôts d'équipements et de matériels.

Des capacités d'entreposage de colis de déchets pourraient être intégrées aux installations précédemment décrites, sans que cela ne constitue un impératif technique au stade actuel du recensement des besoins en entreposage (Andra, 2009a). Cela pourrait consister en des modules d'entreposage de décroissance thermique de colis HA (typiquement un ou deux modules de capacité unitaire de 725 à 970 m^3 exprimée en volume de colis primaires, avec une puissance thermique en entrée de l'ordre de 1 kW par colis), un module d'entreposage de colis de stockage HA dédié au soutien à la réversibilité du stockage (qui pourrait présenter une capacité de 100 à 500 m^3 à titre d'exemple) et/ou de modules d'entreposage de colis de déchets MAVL donnant une plus grande flexibilité à la gestion de ces déchets et apportant un soutien à la réversibilité du stockage (pour une capacité de l'ordre de plusieurs centaines de mètres-cubes, ramenée au volume des colis primaires).

L'emprise des installations de la zone « descenderie » est estimée à ce stade des études à une centaine d'hectares, dont un tiers réservé à l'emprise des verses de déblais de creusement de la descenderie.

[23] La desserte du centre de stockage nécessitera néanmoins des aménagements sur les infrastructures existantes : le réseau routier secondaire n'est pas entièrement aménagé hors gel, des aménagements seraient nécessaires sur le réseau ferroviaire secondaire, les traversées d'agglomérations sont à examiner. Des créations d'infrastructures pourraient également être envisagées, par exemple pour permettre une desserte ferroviaire directe du centre de stockage. Les itinéraires pour les transports exceptionnels devront être précisés. Compte tenu de sa capacité limitée, les possibilités d'utilisation du réseau fluvial seront examinées dans une phase ultérieure des études. Ces aménagements pourront également bénéficier au développement local (Andra, 2009f).

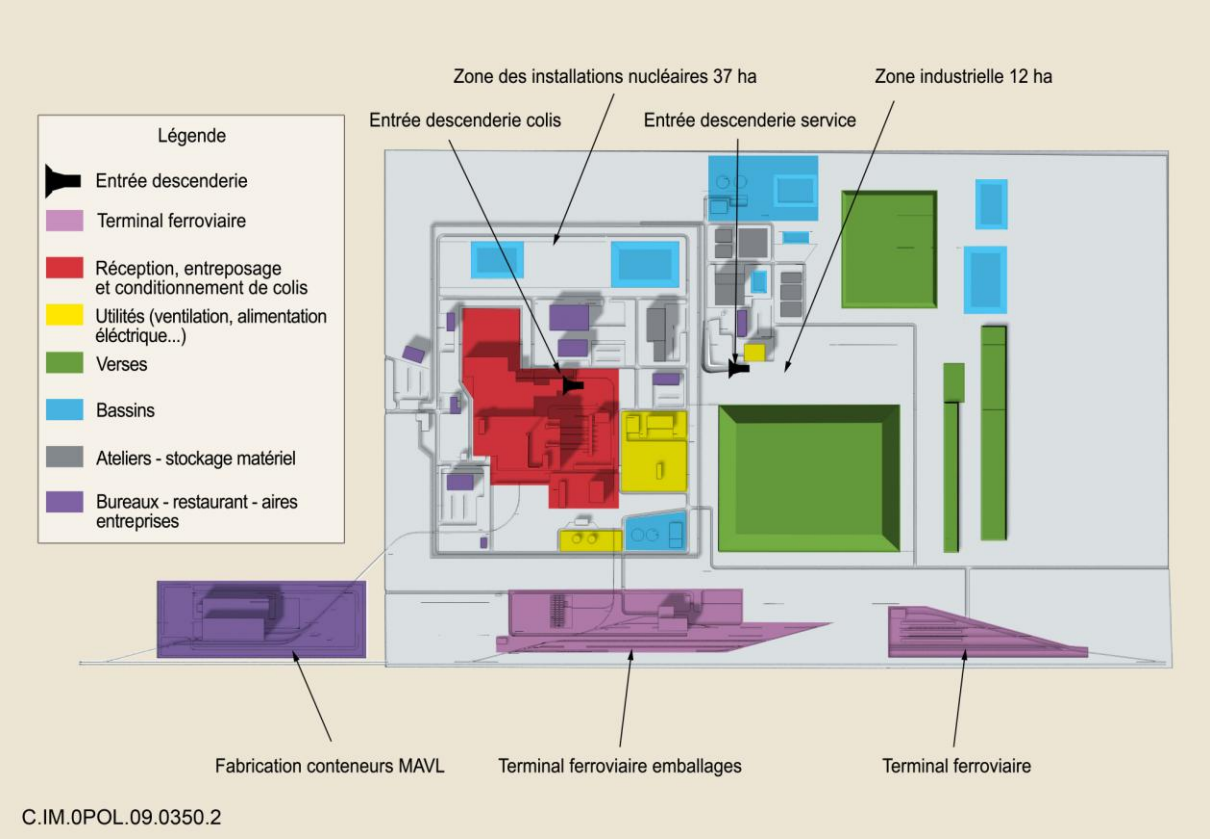


Figure 2.2-5 Schéma des installations de surface de la zone « descenderie »

Certaines fonctionnalités des installations nucléaires s'avérant nécessaires dès la mise en exploitation du centre de stockage, les ateliers correspondants seront construits avant 2025. Le phasage sera précisé au moment de la Demande d'Autorisation de Création. D'autres pourront être mis en place ultérieurement, au fur et à mesure des décisions en matière de gestion des différents déchets, par exemple les capacités d'entreposage optionnelles mentionnées plus haut. Aussi, le bâtiment regroupant les ateliers depuis la réception des emballages de transports jusqu'à la mise des colis de stockage dans les hottes de transferts adoptera une architecture modulaire, préservant la possibilité d'adjoindre des ateliers supplémentaires. Comme pour les installations souterraines, cette architecture sera évolutive vis-à-vis de la conception de nouveaux ateliers.

2.2.3 Description des colis de déchets réceptionnés et conditionnés dans les installations de surface

Le conditionnement des déchets, dit « colis primaire », qui est réalisé par les producteurs, est à compléter afin de faciliter l'exploitation du centre de stockage ou de répondre aux fonctions de sûreté après fermeture (cf. § 1.6.12 et Chapitre 4). Ceci conduit notamment à placer et/ou regrouper des colis primaires dans des compléments de colisage, appelés « colis de stockage ».

Les colis réceptionnés par les installations de surface (zone descenderie) seront principalement des colis primaires : la possibilité d'accueillir des colis de déchets HA et MAVL dont le conditionnement en colis de stockage aurait déjà été réalisé dans les installations des producteurs de ces déchets ou issus de la réversibilité est également prise en compte dans les options de conception (Andra, 2009c).

2.2.3.1 Description des colis de déchets HA ou de combustibles usés (de type CU3)

Les colis primaires

Les colis primaires HA sont pour l'essentiel des produits de fission et des actinides mineurs (neptunium, américium et curium contenus dans les combustibles usés qui sont séparés de l'uranium et du plutonium lors du traitement) calcinés et incorporés dans une matrice de verre, elle-même coulée

en température dans un conteneur en acier inoxydable. La haute activité des déchets HA vitrifiés génère un dégagement thermique important qui décroit dans le temps. Les colis primaires de combustibles usés sont constitués d'éléments combustibles non traités mis en étuis puis regroupés dans des conteneurs. Les différents types de colis primaires HA ou de combustibles usés ainsi que leurs caractéristiques sont présentés aux § 1.6.7 et 1.6.8).

Le scénario possible de mise en stockage des déchets HA et des combustibles usés, actuellement envisagé (Andra, 2009a), prévoit un flux dans les installations nucléaires de surface pouvant aller d'une centaine de colis à 500 colis primaires par an. Les premiers colis primaires HA qui pourront être réceptionnés dès la première décennie d'exploitation dans les installations de surface du centre de stockage sont les déchets vitrifiés produits dans l'installation PIVER de Marcoule, colis de type C0.1 du MID 2009 (cf. Figure 2.2-6). Ensuite, les déchets vitrifiés produits par l'Atelier de Vitrification de Marcoule (AVM), colis de type C0.3 du MID 2009, pourraient être livrés entre 2030 et 2045[24] (cf. Figure 2.2-7).

Figure 2.2-6 Colis PIVER

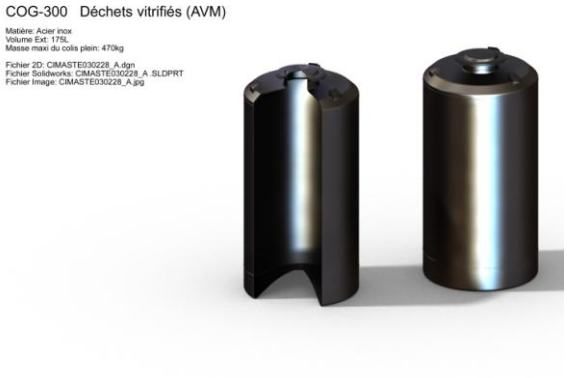


Figure 2.2-7 Colis de l'AVM

Les colis de stockage

Les colis de stockage doivent accueillir des colis de déchets fortement irradiants parmi lesquels on distingue des déchets moyennement exothermiques (C0) à fortement exothermiques (autres colis HA) (Andra, 2009d).

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement des fonctions de sûreté, décrites aux chapitres 3 et 4, sont les suivantes :

- la conception du colis de stockage doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution du déchet dans le temps…) et de leur effet que ce soit en situation normale ou accidentelle,
- le colis de stockage doit être étanche à l'eau,
- la qualité de conception et de fabrication du colis de stockage doit garantir sur la période de l'exploitation de l'installation un maintien de ses caractéristiques mécaniques, chimiques et géométrique assurant la protection du colis primaire vis-à-vis des agressions, assurant l'absence de risque de criticité et l'absence d'endommagement (physique, chimique ou thermique) du colis primaire.

Le colis de stockage HA est constitué d'un surconteneur, son besoin découle des exigences en matière de sûreté à long terme et en particulier pour satisfaire la fonction « interdire l'arrivée d'eau au contact du verre pendant la période thermique caractérisée par une température supérieure à 50 °C » (cf. § 1.6.12).

[24] En variante à la réception de ces colis en colis primaires, la possibilité de les recevoir en colis de stockage, dont le conditionnement aurait préalablement été effectué dans les installations du producteur est envisagée.

Ce surconteneur est constitué d'une virole en acier non allié de 55 mm d'épaisseur, et contribue à satisfaire les objectifs de protection, mais ne permet pas de conduire les opérations de manutention sans protection supplémentaire compte tenu du niveau d'irradiation. Il participe aussi à la protection des colis primaires dans les situations accidentelles de chute/collision et d'incendie afin de limiter la dispersion de substances radioactives dans les installations et l'environnement.

Chaque colis de stockage sera conçu pour recevoir unitairement[25] un colis primaire de déchets, ou des étuis de combustibles usés. Les dimensions extérieures des colis de stockage HA diffèreront selon les conteneurs primaires (cf. Figure 2.2-8). Ainsi, deux diamètres sont considérés :

- l'un correspond aux déchets vitrifiés HA produits à La Hague (colis de type C0.2 et C1 du MID 2009) ainsi qu'à ceux qui ont été produits dans l'installation PIVER de Marcoule (colis de type C0.1 du MID 2009),
- l'autre correspond aux colis produits dans l'AVM (colis de type C0.3 du MID 2009).

Les combustibles usés non retraités (CU3) sont conditionnés dans des étuis de géométrie variable. Pour leur stockage, on considère une mise en surconteneur similaire aux déchets HA de La Hague et de l'installation PIVER.

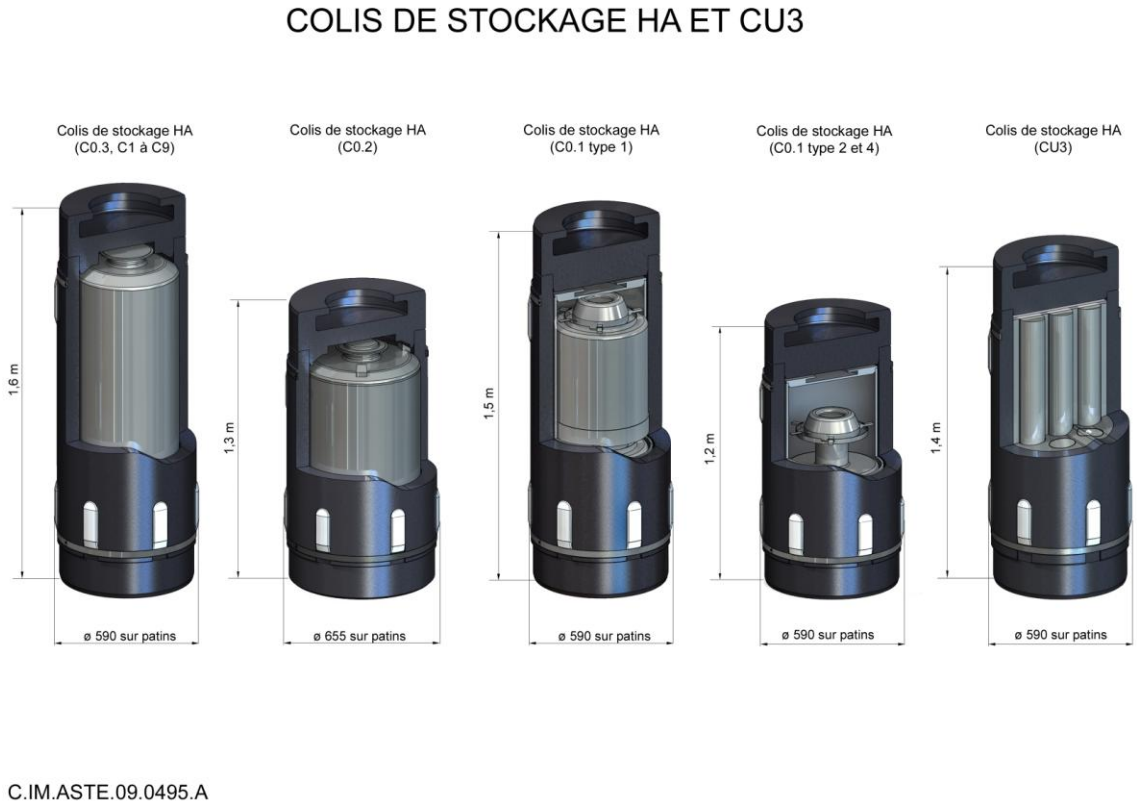


Figure 2.2-8 Colis de stockage de déchets HA et CU3

La manutention du colis de stockage HA est assurée par une gorge de préhension usinée directement dans le couvercle de fermeture du surconteneur. La résistance de l'enveloppe et de la gorge de manutention du surconteneur ont été respectivement vérifiées en analysant les contraintes calculées pour différentes sollicitations, suivant les prescriptions du Code de Construction des Appareils à Pression (CODAP) et les règles préconisées par la Fédération Européenne de la Manutention (FEM). L'utilisation de ce code et de ces règles qualifiés améliore le niveau de confiance du dimensionnement.

[25] Il pourrait cependant en être différemment pour les déchets vitrifiés de l'atelier pilote PIVER (colis de type C0.1 du MID 2009), pour lesquels il est envisagé de regrouper deux colis primaires dans le colis de stockage.

Le colis de stockage est doté de patins en céramique inerte évitant un contact direct acier/acier entre le surconteneur et le chemisage des alvéoles de stockage. Compte tenu de l'importance de ces patins qui facilitent la mise en place, puis éventuellement le retrait, des colis HA dans les alvéoles de stockage, des contrôles des patins sont envisagés avant et/ou après leur montage sur les conteneurs vides.

Les procédés de réalisation du surconteneur ont été choisis pour limiter les facteurs de corrosion localisée induite par le processus de fabrication. La qualité métallurgique des composants du surconteneur est ensuite vérifiée durant toutes les étapes de la fabrication (analyse chimique, essais mécaniques sur éprouvettes, contrôle ultrasons...) suivant des procédures qualifiées et normalisées en fonction du processus de fabrication retenu.

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

La Figure 2.2-9 présente les différents constituants d'un colis de stockage HA (colis de type AVM : colis de type C0.3 du MID 2009).

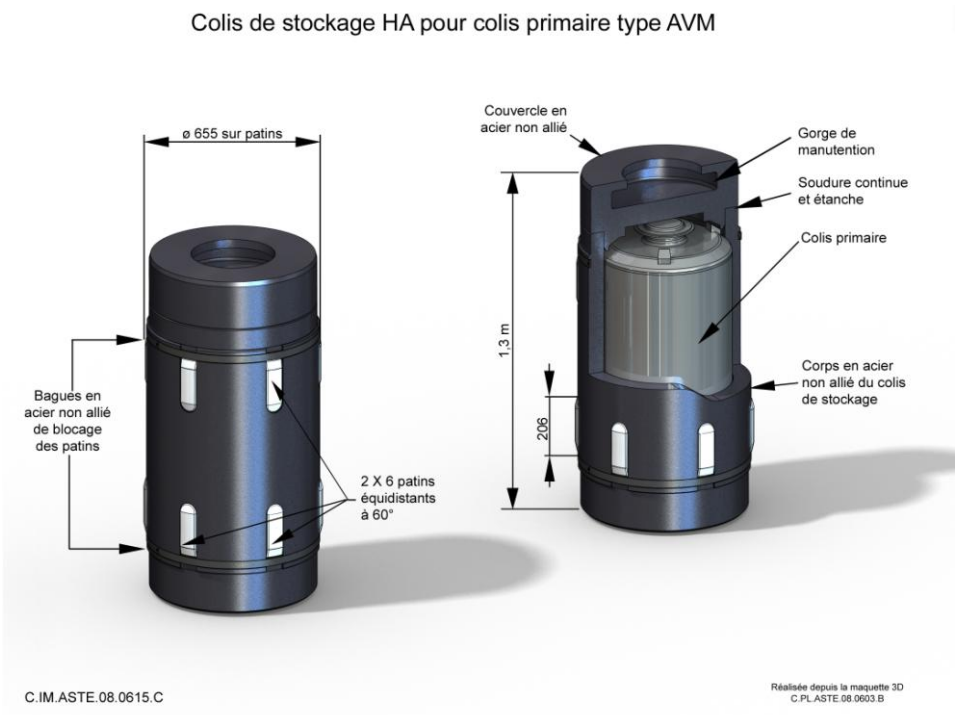


Figure 2.2-9 *Schéma du colis de stockage HA de type AVM (colis C0.3 du MID 2009)*

Plusieurs niveaux de contrôle interviennent tout au long du procédé d'assemblage, avant, durant et après le soudage. Avant le soudage, le contrôle consiste à vérifier les qualités géométriques, structurelles et magnétiques des zones à souder (partie surconteneur et partie couvercle). Pendant le soudage, un enregistrement des paramètres de soudage par faisceau d'électrons est effectué. Cette phase permet de mettre en évidence les dysfonctionnements éventuels lors du soudage et de garder une traçabilité sur les opérations effectuées. Après le soudage, le contrôle doit permettre de vérifier la qualité de l'assemblage, notamment au niveau de la soudure. Deux types de contrôles sont envisagés : un contrôle de surface visuel par caméra et un contrôle volumique par ultrasons.

2.2.3.2 Description des colis de déchets MAVL

Les colis primaires

Les déchets MAVL se caractérisent par une activité beta-gamma 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 conditionnements. Certains colis de déchets MAVL contiennent des matières organiques ou de l'eau (dans le cas d'un conditionnement recourant au ciment), qui génèrent de l'hydrogène gazeux sous l'effet de la radiolyse. Ces colis émettent aussi des radionucléides gazeux. Les différents types de colis primaires ainsi que leurs caractéristiques sont présentés aux § 1.6.7 et 1.6.8).

Le scénario possible de mise en stockage des déchets MAVL actuellement envisagé (Andra, 2009a), prévoit un flux dans les installations nucléaires de surface pouvant aller de 1000 à 5000 colis primaires par an. Les premiers colis primaires MAVL qui pourraient être réceptionnés dès la première décennie d'exploitation dans les installations de surface du centre de stockage sont :

- les conteneurs inox (cf. Figure 2.2-10) :
  - ✓ d'enrobés bitumineux de la STEL produits depuis octobre 1996 et de STE3 : colis B2.3 du MID 2009,
  - ✓ de boues STE2 conditionnées dans une matrice bitumineuse : colis B2.4 du MID 2009,
- éventuellement, les conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C) : colis B5 du MID 2009 (cf. Figure 2.2-11),

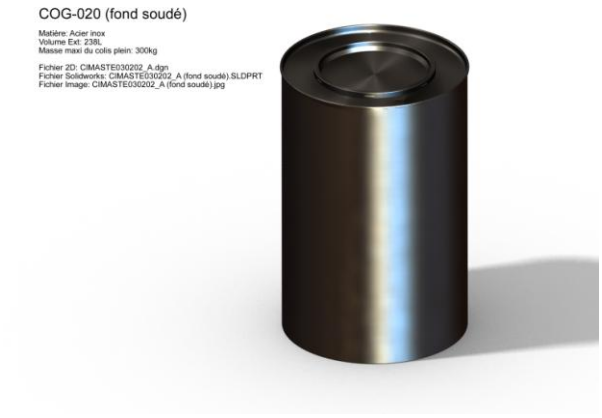


Figure 2.2-10 Conteneur standard inox

Figure 2.2-11 Colis standard de déchets compactés (CSD-C)

De plus, il est envisagé de reconditionner les fûts d'enrobés bitumineux produits avant octobre 1996 (colis B2.5 du MID 2009), à partir de 2017, dans un conteneur de stockage en béton armé (suivant un procédé actuellement à l'étude) sur le site de Marcoule. Ces conteneurs de stockage pourraient être réceptionnés puis directement transférés vers les alvéoles de stockage, sans conditionnement supplémentaire dans les installations de surface du centre de stockage.

Les colis de stockage

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement des fonctions de sûreté, décrites aux chapitres 3 et 4, sont les suivantes :

- la conception du colis de stockage doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, émission de gaz, évolution du déchet dans le temps…) et de leur effet que ce soit en situation normale ou accidentelle,
- la qualité de conception et de fabrication du colis de stockage doit garantir sur la période de l'exploitation de l'installation un maintien de ses caractéristiques mécaniques, chimiques et géométrique assurant la protection du colis primaire vis-à-vis des agressions, garantissant

l'absence de risque de criticité et l'absence d'endommagement (physique ou chimique) du colis primaire.

Compte tenu du très grand nombre et de la très grande diversité de colis primaires MAVL (matériaux, géométries, modes de préhension) qui seront accueillis et traités sur le centre de stockage, l'optimisation des méthodes de mise en stockage conduit à concevoir des colis de stockage standardisés. Le choix de minimiser les catégories de colis de stockage permet de rendre les opérations de manutention des colis aussi simples que possible et facilite la possibilité d'automatisation du processus de conditionnement et de mise en stockage (actions répétitives, opérations de contrôle, etc.), limitant ainsi la présence de personnel.

Le conteneur de stockage MAVL sera un objet massif en béton de forme parallélépipédique, sans vide intérieur autour des colis primaires, hormis les jeux nécessaires à leur mise en place. Le conteneur en béton contribue à la radioprotection, mais ne permet pas, dans la grande majorité des cas, de conduire les opérations de manutention sans protection supplémentaire compte tenu du niveau d'irradiation. Il participe aussi à la protection des colis primaires dans les situations accidentelles de chute/collision et d'incendie afin de limiter la dispersion de substances radioactives dans les installations et l'environnement.

La conception générique des colis de stockage assemblés sur le site consiste à réaliser un conteneur de stockage constitué de deux éléments préfabriqués en béton armé : un corps et un couvercle. Le corps est doté de cloisons internes qui ménagent des logements ajustés à la forme des colis primaires. Après introduction des colis primaires dans le conteneur, le couvercle est emboîté et fixé sur le corps par des vis (cf. Figure 2.2-12). L'interface est assurée par un joint sec (cf. Figure 2.2-13 et Figure 2.2-14). Ce mode de conditionnement utilisant des éléments préfabriqués permet d'éviter la production d'effluents d'exploitation contrairement à une solution avec liant hydraulique (cette dernière solution était présentée dans le Dossier 2005).

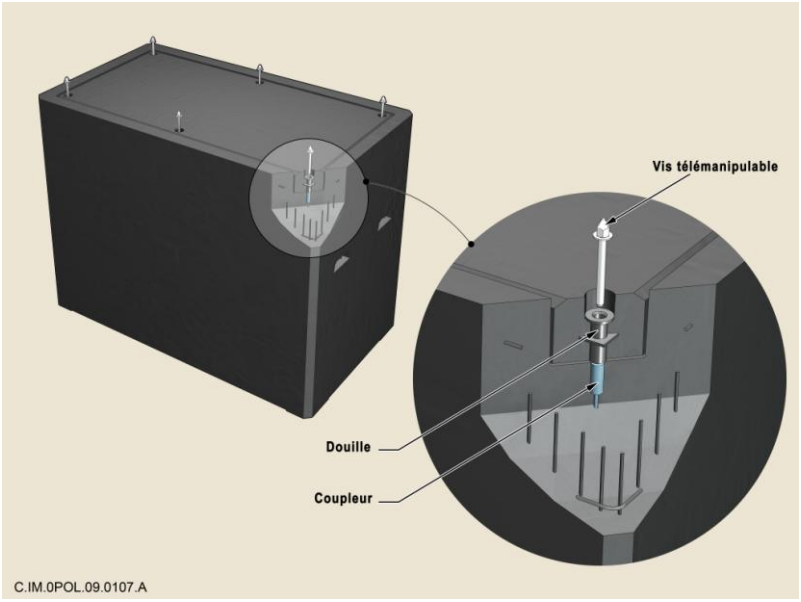


Figure 2.2-12 Système de fixation du couvercle des colis de stockage MAVL

Les colis de stockage seront adaptés au mode de mise en stockage. Un premier procédé (cf. Figure 2.2-13) consiste à manutentionner les colis individuellement avec des engins à fourches, afin de réaliser des piles de colis à l'emplacement de stockage (chariot élévateur) ou en montant des nappes successives de colis (pont gerbeur). Un second procédé (cf. Figure 2.2-14) consiste à réaliser des piles de colis en tête d'alvéole de stockage (pré-empilage) puis à les transporter sur un chariot porteur pour les déposer en fond d'alvéole. Ce second procédé permet de stocker des colis de masse plus importante, jusqu'à 25 tonnes, alors que la limite du premier est de l'ordre de 15 tonnes.

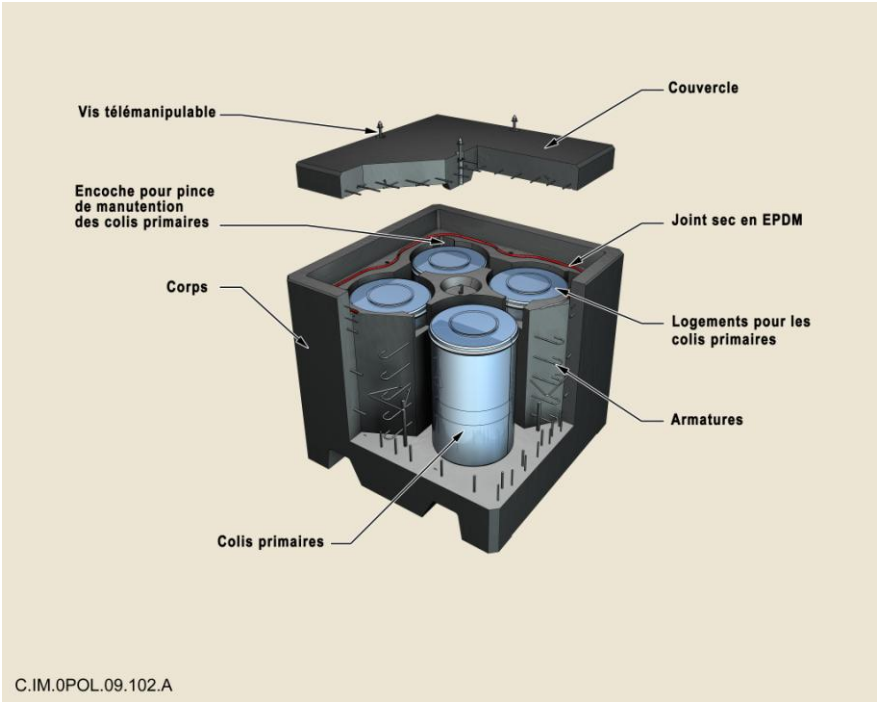


Figure 2.2-13 Colis de stockage MAVL adapté à manutention « individuelle »

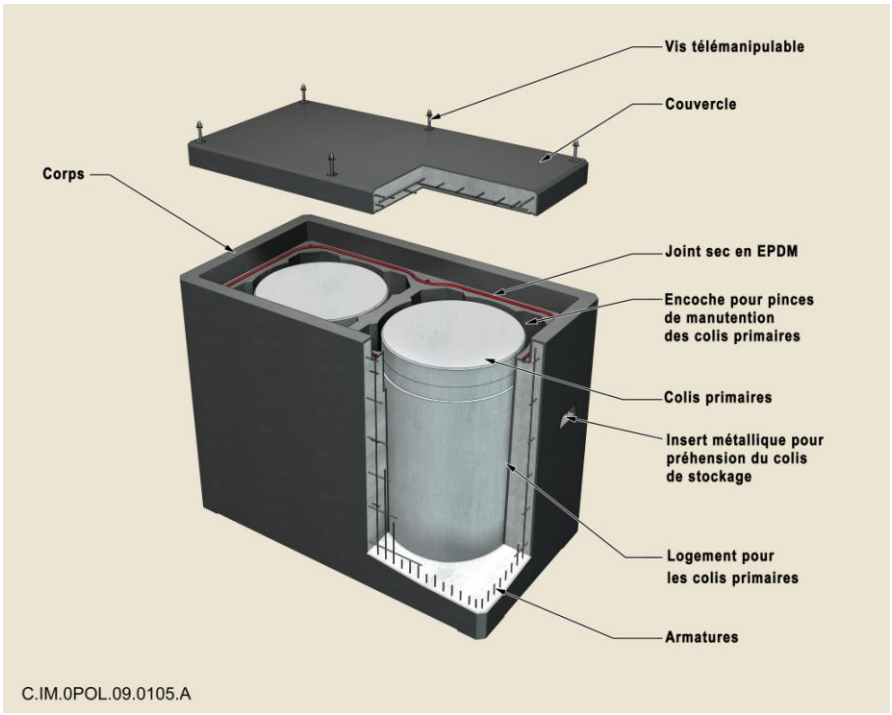


Figure 2.2-14 Colis de stockage MAVL adapté à manutention « après pré-empilage »

Les deux types de conteneurs envisagés pour le stockage des déchets MAVL permettent de simplifier la conception et l'exploitation des chaines de manutention dans les installations en surface et en souterrain.

Les caractéristiques dimensionnelles et radiologiques des colis primaires ainsi que les moyens de transfert actuellement envisagés depuis les installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage (manutention par chariot de pré-empilage pour les colis de grande dimension et manutention par chariot à fourches ou pont gerbeur, pour les colis de petite dimension) sont présentés à titre illustratif

dans le Tableau 2.2-1. Elles pourront évoluer d'ici la Demande d'Autorisation de Création, en fonction des résultats des études d'ingénierie et de sûreté prévues sur la période 2010-2012.

Tableau 2.2-1 Hypothèses de mise en conteneur de stockage des colis type MAVL retenues au stade actuel des études

Intitulé des colis type MAVL	Colis types (MID 2009)	Volume d'un colis primaire (m^3)	Volume d'un colis de stockage (m^3)	Nombre de colis primaires par colis de stockage	Mode de manutention envisagé
Fûts d'enrobés bitumineux (STEL) produits avant octobre 1996, reconditionnés en fûts inox de 380 litres (boues bitumées)	B2.2	0,38	8,17	6	à pré-empilage
Fûts d'enrobés bitumineux produits à partir d'effluents traités dans STE3, en fûts inox de 220 litres (boues bitumées)	B2.3	0,238	7,86	9	à pré-empilage
Fûts d'enrobés bitumineux (STEL) produits depuis octobre 1996, en fûts inox (boues bitumées)		0,23	4,21	4	à pré-empilage
Boues STE2 conditionnés dans une matrice bitumineuse, en fût inox 220 litres (boues bitumées)	B2.4	0,238	7,86	9	à pré-empilage
Fûts d'enrobés bitumineux (STEL) produits avant octobre 1996	B2.5	0,32	4,21	4	individuel
Conteneurs métalliques issus du reconditionnement des coques béton (1 000 litres) de déchets solides cimentés (ciment ou ciment-bitume)	B3.1.1	2,57	10,62	1	à pré-empilage
Déchets solides d'exploitation, cimentés en conteneurs amiante ciment CAC ou béton-fibres CFBC'2 (déchets technologiques)	B3.1.2	1,18	6,95	2	à pré-empilage
Conteneurs métalliques issus du reconditionnement des coques béton (1 800 litres) de déchets solides cimentés (ciment ou ciment-bitume)	B3.1.3	2,57	10,62	1	à pré-empilage
Fûts de concentrâts d'évaporation cimentés en coques béton (conteneurs de 500 litres)	B3.2.3	0,5	7,83	4	à pré-empilage
Fûts de boues de filtration cimentées en coques béton (conteneurs de 500 litres)	B3.2.4	0,5	7,83	4	à pré-empilage
Déchets technologiques métalliques et organiques en fûts inox de 380 litres	B3.3.2	0,38	8,17	6	à pré-empilage
Déchets solides d'exploitation de l'AVM en conteneur inox (déchets technologiques)	B3.3.6	0,175	6,14	6	à pré-empilage
Déchets technologiques métalliques (et organiques) d'exploitation et de démantèlement, en fûts inox de 380 litres	B3.3.7	0,38	8,17	6	à pré-empilage
Déchets pulvérulents cimentés en fûts inox dits « ECE »	B3.3.8	1,5	8,65	2	à pré-empilage
Fûts en acier de boues de filtration cimentées en coques béton (conteneurs de 500 litres)	B3.4.1	0,5	6,53	6	à pré-empilage
Boues et concentrâts cimentés, en fûts métalliques	B3.4.2	0,22	6,53	6	à pré-empilage

Intitulé des colis type MAVL	Colis types (MID 2009)	Volume d'un colis primaire (m^3)	Volume d'un colis de stockage (m^3)	Nombre de colis primaires par colis de stockage	Mode de manutention envisagé
Coques et embouts cimentés en fûts métalliques de 1 500 litres (déchets de structure)	B4.1	1,5	8,65	2	à pré-empilage
Déchets de structure magnésiens en fûts inox de 223 litres	B4.2	0,223	6,53	6	à pré-empilage
Déchets de structure métalliques en fûts inox de 380 litres	B4.3	0,38	7,83	4	à pré-empilage
Déchets de structure et de démantèlement de l'APM en conteneurs acier	B4.4	0,206	6,14	6	à pré-empilage
CSD-C produits suivant la spécification 300AQ 055	B5.2.1	0,183	5,82	8	à pré-empilage
CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP UOX	B5.2.2	0,183	3,66	4	individuel
CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP UOX/URE/MOX	B5.2.3	0,183	3,66	4	individuel
CSD-C contenant des déchets de structure sans déchet technologique (silo HAO)	B5.3	0,183	5,82	8	à pré-empilage
CSD-C contenant des déchets de structure magnésiens (filière UNGG), sans déchet technologique (solos 115 et 130)	B5.4	0,183	5,82	8	à pré-empilage
CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP et RNR (Superphénix)	B5.5	0,183	5,82	8	à pré-empilage
Conteneurs en acier issus du reconditionnement des « blocs sources »	B7.1	3	14,72	2	à pré-empilage
Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction issus du réacteur REP300 – Chooz A	B9.1.1	2	6,58	1	individuel
Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction issus du réacteur EL - Brennilis	B9.1.2	2	6,58	1	individuel
Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction issus du réacteur UNGG – Chinon A	B9.1.3	2	6,58	1	individuel
Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction issus du réacteur UNGG – Saint-Laurent	B9.1.4	2	6,58	1	individuel
Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction issus du réacteur UNGG – Bugey 1	B9.1.5	2	6,58	1	individuel
Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction issus du réacteur RNE Superphénix	B9.1.6	2	6,58	1	individuel
Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés d'exploitation des réacteurs REP	B9.2	2	6,58	1	individuel
Colis de déchets solides d'exploitation moyennement irradiants en fûts acier de 500 litres (déchets technologiques)	B10	0,5	6,95	4	à pré-empilage
Déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume en fûts métalliques de 870 litres	B11.1	0,87	6,13	2	à pré-empilage

Intitulé des colis type MAVL	Colis types (MID 2009)	Volume d'un colis primaire (m^3)	Volume d'un colis de stockage (m^3)	Nombre de colis primaires par colis de stockage	Mode de manutention envisagé
Déchets divers bloqués dans un liant hydraulique en fûts métalliques de 870 litres	B11.2	0,87	6,13	2	à pré-empilage
Fût de 700 litres de concentrâts d'évaporation cimentés reconditionnés en conteneur métallique de 1070 litres	B11.6	1,07	14,72	2	à pré-empilage
Effluents de rinçage vitrifiés en conteneurs inox (CSD-B)	B12.1	0,18	3,66	4	à pré-empilage
Effluents radioactifs provenant du recyclage de Pu vitrifiés, en conteneurs inox	B12.2	0,183	3,66	4	à pré-empilage
Effluents de rinçage des cuves de solutions de produits de fission de Marcoule, vitrifiés en conteneurs inox	B12.3	0,175	6,14	4	à pré-empilage
Déchets de démantèlement du cœur du réacteur Phénix, en « poubelles Phénix »	B13.1	0,206	6,14	6	à pré-empilage
Déchets de bore sodés de Phénix (Barre de commande), en « poubelles Phénix »	B13.2	0,297	6,14	4	à pré-empilage

En conclusion, le choix de conception des colis de stockage MAVL permet de gérer la diversité des colis primaires avec un nombre réduit de colis de stockage, facilitant les opérations de conditionnement et de manutention en permettant une automatisation et une limitation des risques associés à leur gestion (exposition, chute et incendie notamment).

2.2.4 Description des installations nucléaires de surface de la zone « descenderie »

Les installations nucléaires de surface de la zone « descenderie » (cf. Figure 2.2-5) sont décomposées en trois zones distinctes. Ces zones sont :

- le terminal ferroviaire embranché ;
- une zone nucléaire non réglementée ;
- une zone nucléaire réglementée, siège du procédé de prise en charge des colis de déchets, située au sein de la zone nucléaire non réglementée.

2.2.4.1 Terminal ferroviaire

Le terminal ferroviaire embranché assurera la réception des colis de déchets depuis les sites producteurs et le retour des emballages de transport, si la faisabilité en est démontrée. Dans le cas contraire, on recherchera à implanter un accès ferroviaire au plus proche des installations de surface, de manière à limiter le transport des déchets par voie routière. Compte tenu des scénarios de mise en stockage des déchets actuellement envisagés (Andra, 2009a), on estime que le terminal ferroviaire devrait pouvoir accueillir entre 700 et 1 000 emballages par an (1 000 arrivées et 1 000 départs), soit 100 convois de 10 wagons.

Dans le cas d'un site embranché, le terminal ferroviaire, entièrement clôturé et gardienné suivant les prescriptions négociées avec le Haut Fonctionnaire de Défense (HFD), comprendra :

- les voies ferrées et routières de circulation et de stationnement des véhicules (wagons, ensembles routiers),
- une zone couverte de réception et de manutention des emballages,
- des ateliers d'entretien et les locaux administratifs,
- une zone de stockage de transit des emballages.

Dans le cas d'un site non embranché, ce terminal ferroviaire serait situé à quelques kilomètres du site de stockage. Dans ce terminal, les emballages chargés arriveront sur des wagons et repartiront sur des véhicules routiers vers le site de stockage. Les emballages vides reviendront du site de stockage sur des véhicules routiers et repartiront sur des wagons vers les sites de production des déchets. Un terminal routier destiné à recevoir les ensembles routiers en provenance du terminal ferroviaire ou des sites producteurs serait alors construit sur le site. Dans ce terminal, l'emballage serait transféré sur un lorry puis dirigé dans un une zone de transit. Celle-ci permettrait de libérer les ensembles routiers qui font la navette entre le terminal rail-route et le terminal routier, et de limiter le stationnement et l'encombrement de ces ensembles routiers (véhicules + emballages de transport chargés des colis) à proximité immédiate du site afin d'en écarter les risques associés (incendie par exemple).

2.2.4.2 Zone nucléaire non réglementée

La zone nucléaire non réglementée accueillera entre autres :

- des espaces de services au personnel comme des bâtiments administratifs, des parkings et des restaurants d'entreprise,
- des espaces techniques comme des magasins, des ateliers et une aire de réception des conteneurs de stockage en béton (vides),
- des espaces dédiés à la gestion des eaux : les bassins d'orage, les réserves d'eau pour la lutte contre l'incendie et une station d'épuration,
- des espaces dédiés aux utilités diverses comme des postes de transformation.

2.2.4.3 Zone nucléaire réglementée

Les ateliers (cellules, locaux…) dédiés aux activités nucléaires en surface seront regroupés, en optimisant les surfaces utiles au procédé et en minimisant les trajets des colis, dans un même bâtiment. Dans ce bâtiment, les locaux présentant les risques nucléaires les plus importants (locaux où sont manutentionnés et entreposés les colis primaires ou les colis de stockage) seront localisés au centre du bâtiment (limitation des risques de dissémination de substances radioactives, cf. § 2.3.1.1, et des risques d'exposition, cf. § 2.3.1.2). Ce bâtiment sera constitué de plusieurs blocs, construits sur des radiers indépendants et liés entre eux par des joints (conférant une meilleure résistance aux sollicitations sismiques). Dans la vision actuelle, les différents blocs qui constitueront le bâtiment, dont l'agencement est présenté sur la Figure 2.2-15, sont les suivants :

<u>Bloc 1 : Conduite et utilités</u>

Ce bloc, situé en périphérie du bâtiment, comprendra notamment une salle de conduite du bâtiment, des locaux électriques, des vestiaires et des locaux d'accès du personnel à la zone contrôlée.

<u>Bloc 2 : Hall principal de réception des emballages de « type B » à déchargement vertical</u>

Les colis primaires seront en général réceptionnés sur le site du centre de stockage dans des emballages lourds de « type B », dont le déchargement se fait après basculement de la position horizontale du transport à la position verticale.

Le hall de réception des emballages à déchargement vertical comprendra des lignes de roulement des lorrys et de dépose des emballages, une zone d'entreposage des capots des emballages, des outils de préhension et de basculement associés et des postes de contrôle de non contamination des emballages.

<u>Bloc 3 : Déchargement et conditionnement des colis primaires</u>

Ce bloc comprendra les lignes de déchargement des emballages de transport (après préparation et accostage) et de conditionnement des colis primaires en colis de stockage. Les lignes de déchargement des emballages de transport seront polyvalentes de manière à couvrir la diversité de colis. L'une d'elle sera toutefois prioritairement affectée aux colis de déchets vitrifiés (HA), combustibles usés (CU3) et aux conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C).

En fonctionnement normal, les colis primaires seront acheminés de leur déchargement jusqu'à leur conditionnement sur une même ligne. Toutefois, les cellules de déchargement de ces colis pourront

communiquer entre elles par l'intermédiaire de tunnels, perpendiculaires aux lignes de conditionnement, permettant ainsi l'orientation des colis primaires vers les lignes de conditionnement associées (MAVL ou HA), en cas d'incidents sur une des lignes de déchargement.

Bloc 4 : Entreposage de transit de colis de stockage MAVL

Les capacités unitaires des emballages de transport en colis primaires étant différentes, la gestion de la variation de capacité entre la réception des colis primaires en emballages de transport et le transfert des colis de stockage en hotte vers les installations souterraines sera effectuée dans les installations de surface, préférentiellement après conditionnement des colis primaires en colis de stockage dans le but de limiter au maximum les risques liés à l'exploitation (exposition, chute, incendie…).

La zone d'entreposage de transit des colis de stockage MAVL aurait une capacité d'accueil d'environ 200 colis. Elle sera conçue de manière à être le plus polyvalente possible, de manière à pouvoir accepter les différents types de colis de stockage MAVL.

Bloc 5 : Entreposage de transit des colis de stockage HA, locaux de mise en hotte de colis de stockage et utilités

Ce bloc comprend une zone d'entreposage de transit des colis de stockage HA avec une capacité d'accueil de l'ordre d'une centaine de colis de stockage. Il accueille également les locaux dédiés à la mise en hotte des colis de stockage HA et MAVL et des cellules de traitement des colis de stockage non-conformes.

En périphérie du bâtiment, sont implantés les locaux « utilités » (locaux électriques, locaux matériels, couloirs de circulation).

Bloc 6 : Entreposage de hottes et accès à la galerie de transfert vers les installations souterraines

Ce bloc comprendra l'accès à la galerie de transfert vers les installations souterraines. Il sera constitué d'une zone d'entreposage des hottes vides et des voies de circulation de l'engin de transfert.

Bloc 7 : Hall de réception des emballages hors « type B »

Un hall de réception spécifique est prévu pour les emballages à déchargement horizontal dont les opérations de déchargement diffèrent de celles réalisées pour les emballages de « type B ». Par ailleurs, ce hall prendrait en charge également les conteneurs Iso IP2 à déchargement vertical.

Compte tenu du fait que certains colis de stockage MAVL conditionnés sur les sites des producteurs (enrobés bitumineux de Marcoule : colis B2.5 du MID 2009 par exemple) pourraient être acheminés avec ce type d'emballage, ce hall de réception sera à proximité directe de l'entreposage de transit associé (bloc 8).

Blocs 8 : Entreposages de transit

Compte tenu de la solution envisagée de réceptionner certains colis de stockage provenant des sites producteurs (cf. § 2.2.3.2), un bloc dédié à l'entreposage de transit des colis de stockage MAVL est prévu (Bloc 8).

Il est à noter que les différents entreposages de transit relatifs aux colis MAVL mentionnés précédemment (Blocs 4 et 8) sont disposés le long d'un couloir commun de transfert des colis. Ceci permet de limiter les moyens de manutention (et donc une limitation du risque de chute) et d'optimiser les interfaces entre blocs.

Figure 2.2-15 Illustration d'un agencement possible du bâtiment de réception, contrôle et conditionnement des colis

2.2.5 Fonctionnement des installations nucléaires de surface de la zone « descenderie »

Les installations nucléaires de surface seront conçues pour une durée de fonctionnement séculaire correspondant à la durée d'exploitation du stockage avant fermeture.

Les installations nucléaires de surface devront pouvoir fonctionner en exploitation normale avec un flux de circulation des colis de déchets depuis leur réception jusqu'à leur transfert vers les installations souterraines. Elles pourront aussi fonctionner en sens inverse pour le soutien à la réversibilité. Dans ce cas de figure, le processus normal d'exploitation serait suspendu ; en effet, il n'y a pas d'intérêt ni de justification à imposer de gérer simultanément deux flux en sens opposés dans ces installations. Et cela permet de limiter les risques de collision et d'erreur humaine qui pourraient en découler.

Dans la vision actuelle, l'agencement des différents locaux de traitement des colis, dont les opérations sont décrites ci-après, est présenté sur la Figure 2.2-16.

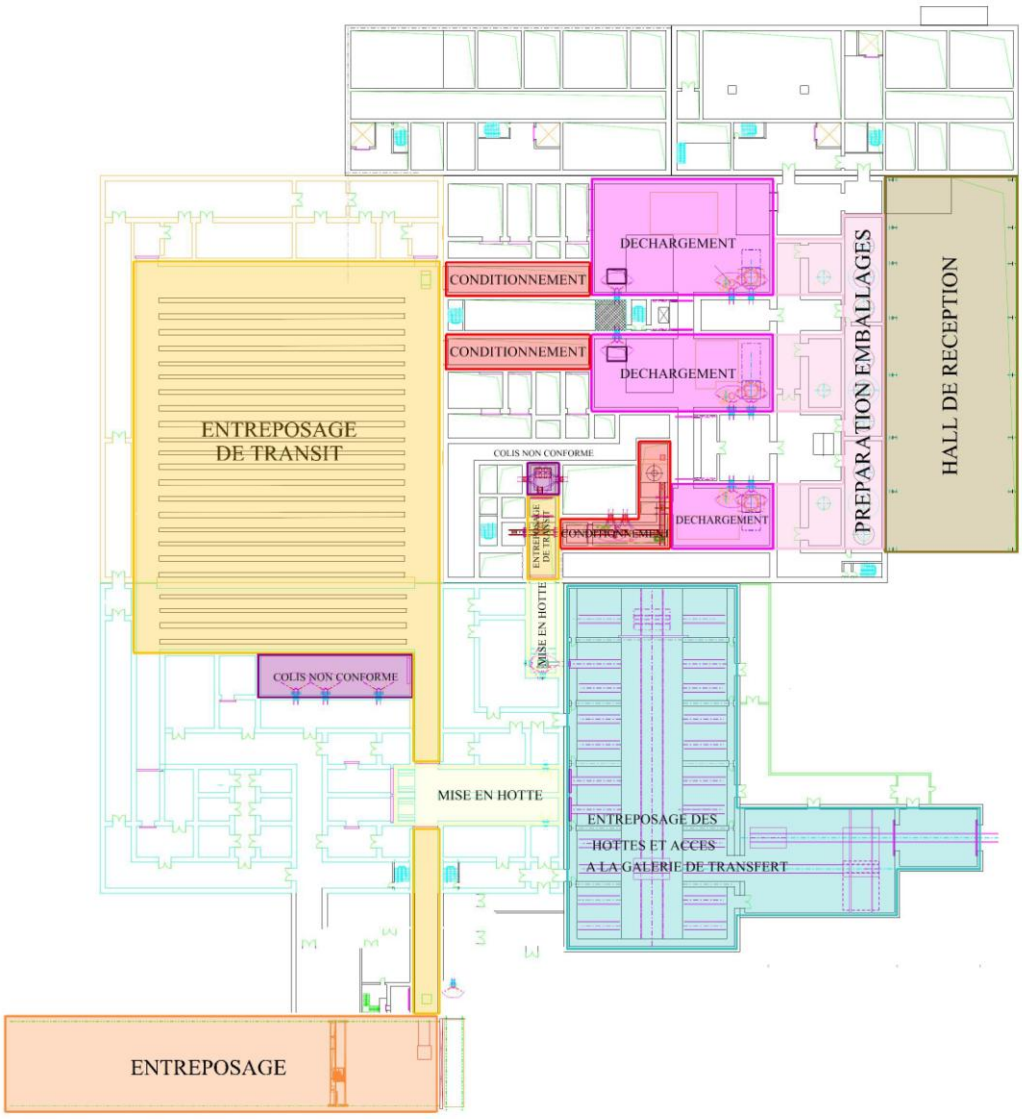


Figure 2.2-16 Agencement des locaux de traitement des colis

2.2.5.1 Réception des colis (emballages de transport)

Les colis de déchets seront acheminés depuis les sites producteurs dans des emballages de transport, par rail, puis par route si le site n'est pas embranché. Des contrôles de contamination externe des emballages et des véhicules de transport seront réalisés à la réception sur le site.

Les emballages de transport à déchargement vertical qui arriveront sur site seront transférés sur des lorrys afin de libérer les moyens de transport pour retour des emballages vides vers les sites producteurs. De plus, la mise sur lorry des emballages facilitera le basculement à la verticale des emballages pour leur déchargement dans la mesure où le lorry est guidé sur les rails. Les lorrys seront ensuite stockés sur des voies d'entreposage de transit en plein air avant leur convoyage vers le hall de réception des colis. En effet, étant donné la diversité des colis de déchets à réceptionner, un parc d'emballages de transport différents et spécifiques à des regroupements de colis sera conçu et optimisé en fonction de la logistique nécessaire. Les emballages sur lorrys seront ensuite orientés vers

le hall principal de réception des emballages puis vers les cellules de préparation et d'accostage des emballages.

Les emballages de transport à déchargement horizontal qui arriveront sur le site seront orientés vers un hall de réception spécifique.

2.2.5.2 Déchargement des emballages

A l'arrivée dans le hall de réception, les deux capots amortisseurs sur chaque extrémité de l'emballage de transport (cas de l'emballage à déchargement vertical) seront démontés à l'aide d'un pont (pont de maintenance et de manutention des capots des emballages.

Un contrôle de non contamination sera réalisé sur les nouvelles parties accessibles de chaque emballage (susceptibles d'avoir été contaminées) avant transfert vers la salle de préparation/accostage de l'emballage et de déchargement des colis primaires (cf. Figure 2.2-17).

Les emballages seront ensuite basculés en position verticale par un pont et des palonniers associés, puis positionnés sur un chariot de transfert.

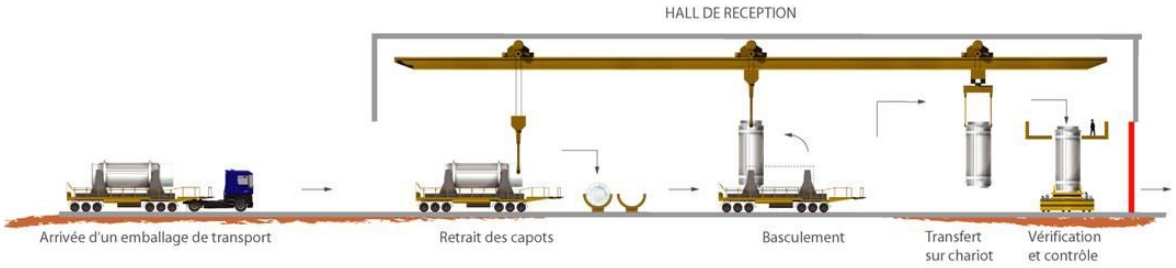


Figure 2.2-17 Synoptique des opérations effectuées dans le hall de réception des emballages

Dans la salle de préparation de l'emballage, celui-ci sera débarrassé de son couvercle puis transféré vers la salle d'accostage, sous une trappe d'accostage afin d'amener le haut de l'emballage au niveau de la cellule de déchargement des colis primaires. Un joint gonflable permettra alors le confinement statique entre l'intérieur et l'extérieur de l'emballage.

Les colis primaires seront enlevés de l'emballage à l'aide d'un pont pour être déposés dans la cellule de déchargement des colis primaires puis soumis à un contrôle de non-contamination (télé-opéré compte tenu du risque d'exposition). Les emballages vides seront évacués par les mêmes opérations qu'à leur réception mais en sens inverse (cf. Figure 2.2-18).

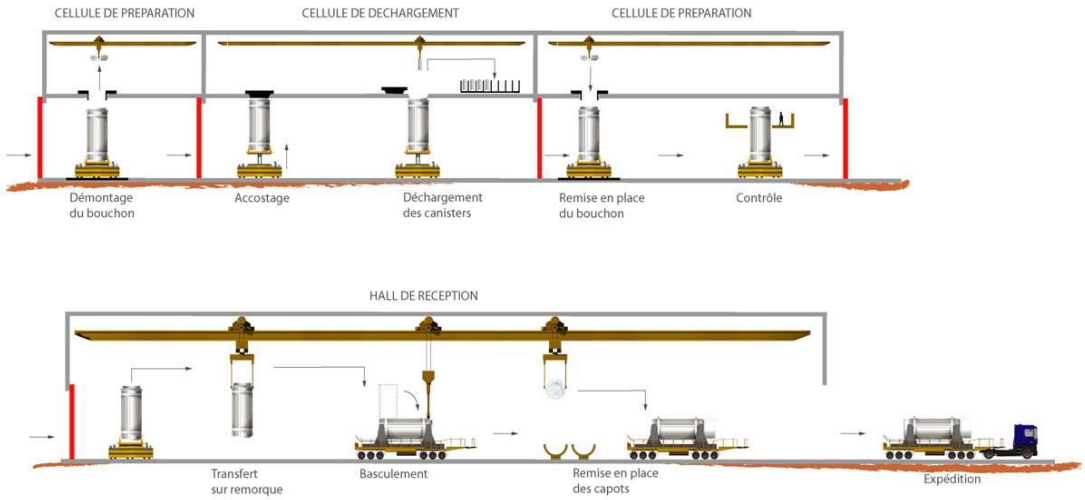


Figure 2.2-18 Synoptique des opérations de déchargement des colis primaires et d'évacuation des emballages vides

2.2.5.3 Ateliers de conditionnement des colis primaires en vue de leur stockage

Les conteneurs en béton pour les colis MAVL et en acier faiblement allié pour les colis HA et CU3 seront fabriqués dans des installations industrielles en dehors de la zone nucléaire. Ils seront acheminés par transport routier ou ferroviaire, puis transférés jusqu'au niveau des cellules de conditionnement des colis primaires. Ensuite, pour minimiser l'exposition du personnel, l'ensemble des opérations de conditionnement des colis primaires sera téléopéré.

Pour ce qui concerne les colis primaires MAVL (cf. Figure 2.2-19), chaque conteneur en béton, sans son couvercle, sera manutentionné par un pont pour être déposé sur un chariot de transfert. Ce chariot acheminera le conteneur dans la cellule de chargement des colis primaires MAVL. Ces derniers seront déposés un par un depuis le niveau supérieur sur une table élévatrice (pour limiter la hauteur de manutention). Une potence récupèrera le colis primaires MAVL en position basse et le déposera dans le conteneur de stockage. Le conteneur plein sera ensuite repositionné sous le pont de manutention, lequel déposera son couvercle. Le colis de stockage MAVL sera enfin acheminé en face de l'allée de circulation du pont équipé des systèmes de vissage du couvercle et un contrôle de non-contamination des colis sera effectué sur le colis de stockage MAVL fini.

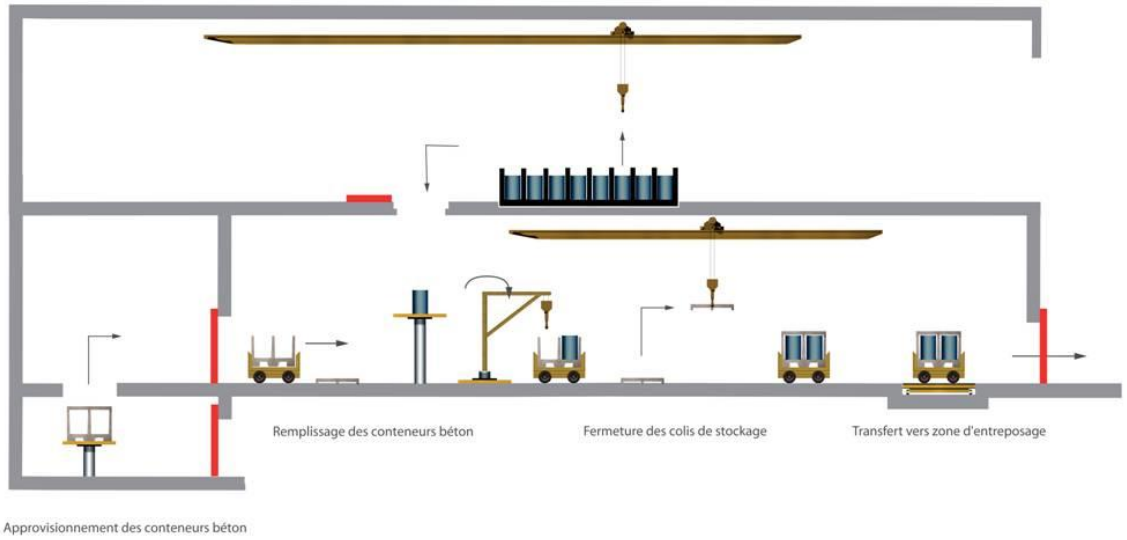


Figure 2.2-19 Synoptique des opérations de conditionnement des colis primaires MAVL en colis de stockage

Pour ce qui concerne les colis primaires HA (cf. Figure 2.2-20), chaque conteneur en acier, avec son couvercle, sera manutentionné par un pont et déposé dans une chambre de démagnétisation. Il sera ensuite repris et déposé sur un chariot de transfert pour être acheminé vers la cellule de chargement des colis primaires. Une potence permettra alors de retirer le couvercle du conteneur. Le colis primaire HA sera ensuite déposé à l'intérieur du conteneur depuis le niveau supérieur (zone de déchargement des colis primaires). Une fois le conteneur chargé, le couvercle sera remis en place par la potence. Les opérations de soudage du couvercle par faisceau d'électrons ainsi que les contrôles de conformité du colis de stockage (contrôle de la soudure, non-contamination des colis) seront alors effectuées, par téléopération.

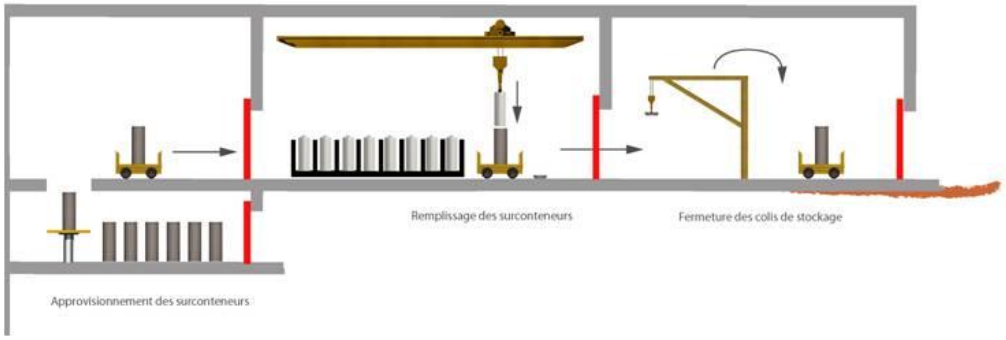


Figure 2.2-20 *Synoptique des opérations de conditionnement des colis primaires HA en colis de stockage*

Les colis de stockage MAVL et HA pourront ensuite être transférés, soit directement vers les ateliers de mise en hotte pour expédition immédiate vers les installations souterraines, soit vers un entreposage de transit dédié. En cas de détection de non-conformité lors des contrôles, le colis de stockage sera orienté vers la cellule de traitement des colis non-conformes dédiée.

Les capacités des zones d'entreposage de transit permettront d'absorber les différences de flux d'entrée et de sortie par accumulation temporaire de colis de stockage. Dans la zone dédiée aux colis de stockage MAVL, ces colis seront déposés sur des longrines, au moyen de navettes de transfert. Dans la zone dédiée aux colis de stockage HA, ceux-ci seront déposés sur une structure d'accueil permettant leur position verticale.

2.2.5.4 Ateliers de mise en hotte des colis de stockage

Les colis de stockage des déchets MAVL et HA, seront transférés des installations de surface jusqu'aux alvéoles de stockage souterraines par l'intermédiaire d'une galerie couverte (descenderie) dans des hottes de protection radiologique.

Pour ce qui concerne les colis de stockage MAVL (cf. Figure 2.2-21), ils seront déposés dans l'atelier de mise en hotte sur une table d'échange à l'extrémité de laquelle la hotte sera accostée. Après ouverture de la hotte, le colis y sera inséré suivant le principe compatible avec le procédé d'extraction du colis au niveau de l'alvéole de stockage.

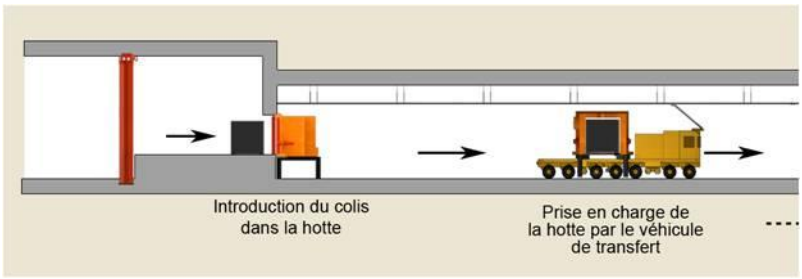


Figure 2.2-21 *Synoptique des opérations de mise en hotte des colis de stockage MAVL*

Pour ce qui concerne les colis de stockage HA (cf. Figure 2.2-22), ils seront mis en position horizontale au moyen d'un basculeur. Une hotte sera alors accostée à l'extrémité de ce dernier et après ouverture de la hotte, le colis sera poussé à l'intérieur.

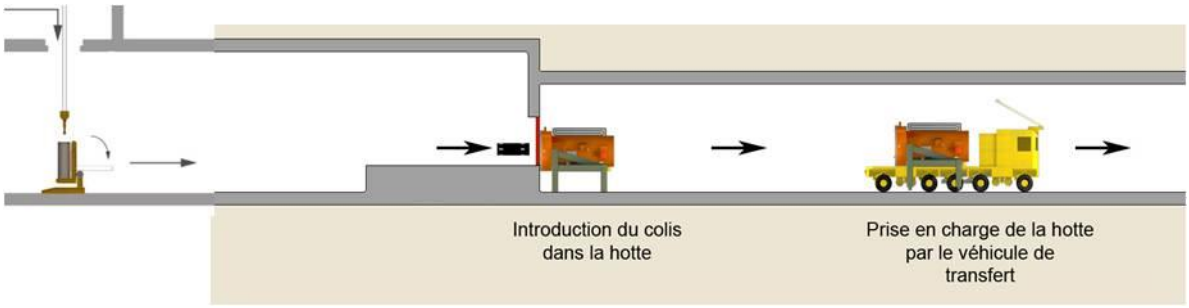


Figure 2.2-22 Synoptique des opérations de mise en hotte des colis de stockage HA

Une fois fermée, chaque hotte sera prise en charge par le véhicule de transfert pour être convoyée vers les installations souterraines.

L'installation nucléaire de surface devrait être capable d'expédier jusqu'à cinq à six colis de stockage (MAVL et/ou HA) par jour vers les alvéoles de stockage souterraines (Andra, 2009a).

2.2.5.5 Concepts d'entreposage complémentaires étudiés (Andra, 2009a)

Des capacités d'entreposage de colis HA supplémentaires pourraient être mises en service à partir de 2035. Elles pourraient éventuellement être localisées sur le site du centre de stockage (alternative à la localisation chez les producteurs, telles que les extensions de E-EV-SE en cours sur le site de La Hague).

De même, à partir de 2040, de nouvelles capacités d'entreposage de colis MAVL pourraient voir le jour sur le centre de stockage, en sus de celles qui seront créées sur les sites producteurs. Un intérêt de la construction des capacités d'entreposage sur le centre de stockage réside dans la mise en commun des moyens de déchargement et de transfert des colis de déchets avec ceux du bâtiment principal.

Concepts d'entreposage de colis HA

Parmi les concepts HA vitrifiés actuellement existants, deux concepts sont basés sur de la convection forcée (R7/T7 et AVM) et un concept est basé sur de la convection naturelle (EEV-SE). Ces concepts correspondent à un entreposage vertical en puits de colis HA vitrifiés empilés unitairement. A ce stade, le concept d'un entreposage avec convection naturelle est privilégié.

Les concepts actuellement envisagés par l'Andra pour répondre notamment au besoin spécifique d'adaptabilité à l'entreposage successif de colis primaires et de colis de stockage sont les suivants :

1. Concept « puits »

Ce concept « puits » permet un entreposage vertical en puits des colis refroidi par convection naturelle (cf. Figure 2.2-23), dérivé du concept EEV-SE mais répondant au besoin de polyvalence colis primaire/colis de stockage. Il utilise des paniers de regroupement des colis et dispose donc de puits de plus grand diamètre que sur EEV-SE. Ce concept peut permettre de répondre à des besoins de capacité d'entreposage importants par la constitution de plusieurs modules successifs. Ce concept permettrait le refroidissement de colis (type C1/C2) depuis une puissance unitaire maximale de l'ordre de 1 000 W.

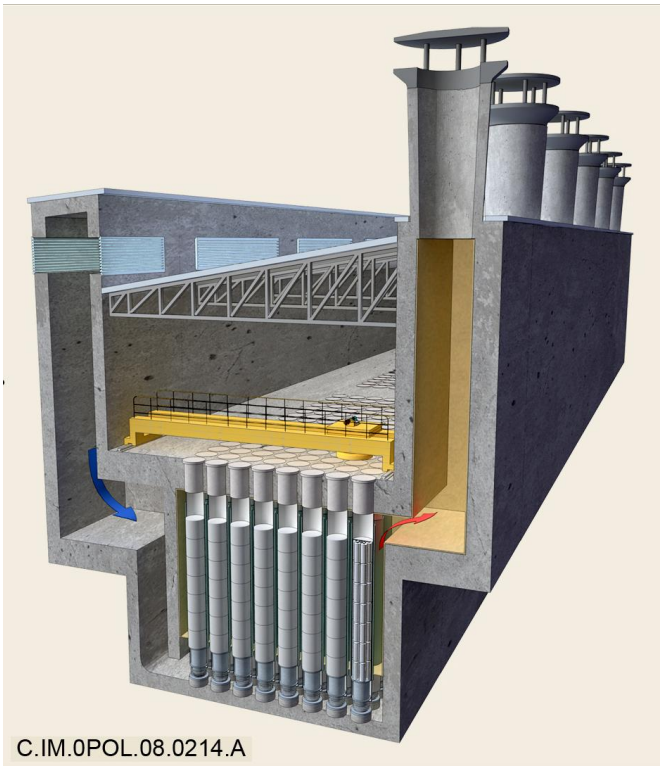


Figure 2.2-23 Schéma de concept d'entreposage en puits

2. Concept « Bâtiment multi-étagé »

Ce concept d'entreposage en « Bâtiment multi-étagé » des colis HA (cf. Figure 2.2-24) est dérivé du concept ECC pour déchets CSD-C de faible puissance thermique ; il comporte une ventilation avec convection forcée. Ce concept permettrait de consolider l'évaluation des concepts à convection forcée, par une approche différente de celle déjà mise en œuvre sur R7/T7. Ce concept pourrait être adapté au transit et au soutien à la réversibilité.

Figure 2.2-24 Schéma de concept d'entreposage en bâtiment multi-étagé

3. Concept « Casemates modulaires en béton sur radier »

Ce concept est un entreposage en casemate béton contenant chacune un panier de colis HA (cf. Figure 2.2-25), dérivé du concept Nuhoms® développé pour l'entreposage de combustibles usés sur des centrales nucléaires. Ce concept est très modulaire. Il pourrait constituer une solution technique au soutien à la réversibilité.

Figure 2.2-25 Schéma de concept d'entreposage en casemates modulaires en béton sur radier

Concepts d'entreposage de colis MAVL

Parmi les concepts MAVL des installations existantes, on trouve principalement des concepts avec gerbage de colis sur un radier d'assez grande longueur (> 60 m) et manutention par pont (comme dans les entreposages de colis primaires à La Hague – DEEB, DEEDS – et à Cadarache dans CEDRA-FI, ou HABOG COVRA aux Pays-Bas). On trouve également un concept (ECC) en bâtiment multi-étagé avec manutention par chariot double (chariot principal et chariot navette pour dépose finale) et un concept en architecture verticale à puits (CEDRA MI) avec manutention par pont et hotte blindée. Ces concepts sont naturellement conservés dans la panoplie de concepts envisageables pour un nouvel entreposage sur site producteur, dédié à un besoin spécifique en matière de colis entreposés.

Les concepts étudiés par l'Andra pour répondre notamment au besoin spécifique d'adaptabilité à l'entreposage successif de colis primaires et de colis de stockage, sont les suivants :

1. Concept « Rayonnages »

Ce concept est un entreposage en rayonnages par transstockeur à satellite (cf. Figure 2.2-26), issu de solutions industrielles classiques. Ce concept sans gerbage direct des colis, offrant une grande aptitude à la surveillance individuelle des colis, est particulièrement bien adapté pour des colis primaires de dimensions et masses réduites, inférieures à une tonne. Le principe reste toutefois viable pour les colis de masse plus élevée dans la limite de supportage de charges statiques des rayonnages. Par contre, pour les colis les plus lourds, des solutions de manutention alternatives au transstockeur (table à ciseaux) doivent être développées.

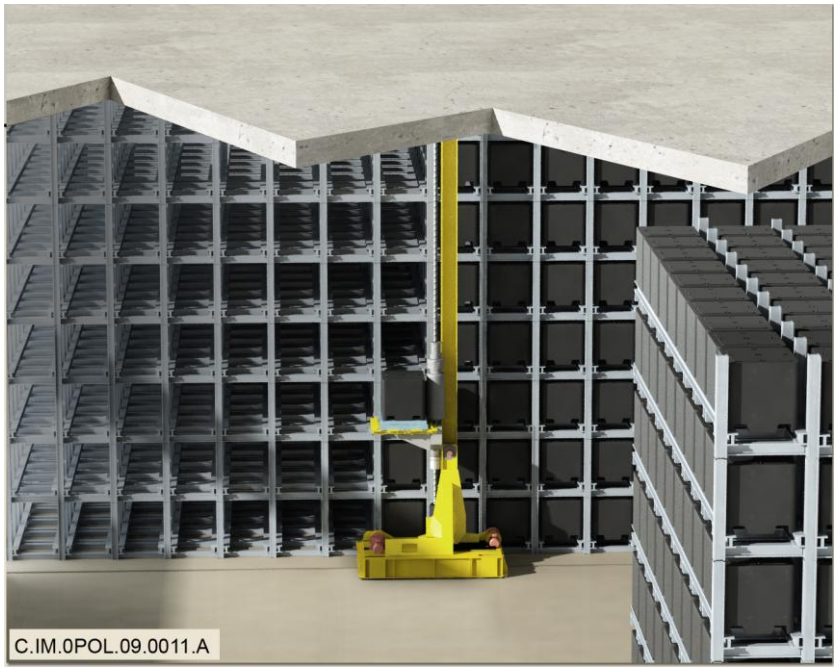


Figure 2.2-26 Schéma de concept d'entreposage en rayonnage par transstockeur à satellite

2. Concept « Longrines »

Ce concept est un entreposage sur longrines par chariots navettes (cf. Figure 2.2-27). Ce concept permet d'explorer une solution avec une manutention au sol et un gerbage réduit, en variante des solutions classiques par pont roulant. L'emploi de longrines a été imaginé de manière à apporter un degré optimum de polyvalence dans l'entreposage des différentes natures de colis.

Figure 2.2-27 Schéma de concept d'entreposage sur longrines par chariots navettes

2.3 Maitrise des risques

Les mesures de maitrise des risques, qu'ils soient nucléaires, non nucléaires d'origine interne ou d'origine externe, sont proposées en appliquant le principe de défense en profondeur, selon la démarche en trois temps exposée ci-après :

- prévenir les incidents dès la conception par le dimensionnement des installations et la proposition de mesures de prévention, en prenant en compte les défaillances possibles des matériels et des hommes et les agressions externes ;
- définir des moyens de surveillance des installations et des équipements pour détecter les dérives de fonctionnement éventuelles et les corriger par des systèmes automatiques ou par l'action d'opérateurs, le système restant ainsi dans son domaine normal de fonctionnement ;
- postuler que l'incident peut se produire malgré les précautions prises et définir les mesures de protection à mettre en œuvre pour en limiter les conséquences et réduire sa gravité.

2.3.1 Risques d'origine nucléaire

Les installations de surface du centre de stockage ont pour fonction principale d'accueillir les colis de déchets primaires afin de les conditionner (colis de stockage) en vue de leur transfert vers les alvéoles de stockage. En fonctionnement normal, les substances radioactives contenues dans les colis primaires et de stockage émettent des rayonnements ionisants.

Les substances radioactives présentent des risques radiologiques (exposition externe et interne) pour le personnel, le public et l'environnement. L'identification des risques est faite sur la base des données relatives aux caractéristiques des colis (spectre des radionucléides, activités, …) et des données relatives au procédé d'exploitation (y compris les opérations de surveillance / contrôle radiologique et de maintenance) mis en œuvre dans les installations en fonctionnement normal.

Les risques radiologiques dans les installations nucléaires sont :

- l'exposition externe : elle est provoquée par les rayonnements ionisants émis par les substances radioactives présentes dans les colis primaires et les colis de stockage. Les rayonnements γ et neutrons sont les principaux contributeurs pour l'exposition externe,
- l'exposition interne : elle est provoquée par la présence de substances radioactives suite à une incorporation par inhalation, ingestion ou passage transcutané.

Les principales fonctionnalités des installations nucléaires de surface (réception, déchargement, conditionnement et transfert des colis vers les installations souterraines, y compris l'entreposage temporaire, dit entreposage de transit, pour la gestion des flux de réception/mise en stockage des colis) s'avérant nécessaires dès la mise en exploitation du centre de stockage, les ateliers correspondants seront construits avant 2025. Cette phase de construction des installations de surface avant 2025 qui sera précisée au moment de la Demande d'Autorisation de Création n'engendrera pas de risques nucléaires. Toutefois, la construction des locaux et des équipements respectera les exigences nécessaires aux fonctions de sûreté à assurer dès la mise en service.

Pour les ateliers qui pourraient être mis en place ultérieurement (choix d'architecture modulaire du bâtiment principal de l'installation nucléaire permettant l'adjonction d'ateliers supplémentaires, cf. § 2.2.2.2) tout en poursuivant l'exploitation des autres, les risques engendrés par la construction pouvant atteindre des fonctions de sûreté des installations de surface du centre de stockage en exploitation seront pris en compte (cf. § 2.3.2.9).

En exploitation, les fonctions de sûreté associées aux installations de surface du centre de stockage se déduisent des voies d'atteintes et des risques principaux induits par la présence des déchets radioactifs dans les colis primaires et de stockage (cf. § 1.6.12). Il s'agit de :

- confiner la radioactivité, de manière à se prémunir du risque de dissémination de substances radioactives. Cette fonction permet également, de fait, de confiner d'éventuels toxiques chimiques,
- protéger les personnes contre l'exposition externe,
- assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité,
- évacuer la puissance thermique résiduelle des déchets,

- évacuer les gaz de radiolyse en provenance des colis de déchets (primaire et de stockage).

La présentation des situations et des dispositions retenues pour maintenir chacune de ces fonctions est déclinée dans les paragraphes qui suivent avec pour objectif de montrer que les risques associés sont maîtrisés.

2.3.1.1 Risques de dissémination de substances radioactives

Le risque de dissémination est lié à la réception et à la manutention de colis de déchets radioactifs. Les déchets radioactifs sont notamment conditionnés dans des matrices bitume (comme par exemple, les fûts d'enrobés bitumineux produits dans la station de traitement des effluents n° 3 (STE3) de La Hague ou les fûts d'enrobés bitumineux produits dans la station de traitement des effluents liquides de Marcoule, colis B2.2, B2.3 et B2.5 du MID 2009), dans des galettes compactées (c'est le cas des conteneurs standard de déchets compactés (CSD-C), colis B5 du MID 2009) et dans des matrices verre (cela concerne les conteneurs standard de déchets vitrifiés, colis C du MID).

Par ailleurs, des déchets susceptibles de contenir des substances radioactives seront générés par l'exploitation des installations (issus des opérations de lavage des locaux, des opérations éventuelles de décontaminations à réception des colis, des opérations de contrôle effectuées dans le cadre d'un programme de surveillance ou des opérations de collecte suite à une inondation interne ou lors de l'extinction d'un incendie).

Compte tenu des contrôles de non contamination faits dès la réception sur le site des colis primaires et des modes de transfert, la majorité des opérations réalisées sur les colis de déchets dans les installations de l'Andra ne seront pas disséminantes.

Risques de dissémination de substances radioactives en fonctionnement normal

Quelques situations sont toutefois susceptibles de conduire à une dissémination de substances radioactives en fonctionnement normal.

C'est notamment l'émission de radionucléides gazeux pour les colis MAVL (^{3}H, ^{85}Kr, ^{14}C principalement). Ce n'est pas le cas pour les colis primaires HA ou de combustibles usés qui seront réceptionnés dans les installations de surface du centre de stockage en conteneurs étanches (Andra, 2009d). Les rejets gazeux émis par les installations nucléaires de surface du centre de stockage, estimés à ce stade des études, sont de l'ordre du µSv par an (évaluation à 500 m du point de rejet, en considérant une hauteur de cheminée d'une vingtaine de mètres et la présence dans les installations situées en surface de 5000[26] colis primaires ; compte tenu des données disponibles, les colis considérés sont les colis standards de déchets compactés de coques et embouts, colis B5 du MID 2009, avec des débits de relâchements gazeux de 420 Bq/h/colis en ^{3}H et ^{14}C et de 7080 Bq/h/colis en ^{85}Kr (cf. § 1.6.8). Une estimation plus précise des rejets en fonctionnement normal, prenant notamment en compte les dispositifs de filtration/traitement et des éventuelles mesures avant rejet, sera effectuée d'ici la Demande d'Autorisation de Création (DAC) lorsque la localisation de l'implantation des installations de surface sera précisée.

Cela pourrait également être le retrait des colis dans le cadre de la réversibilité. Un retrait des colis pourrait être décidé par les générations futures dans le cadre d'une gestion réversible du stockage en formation géologique (cf. Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006, de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs). Dans ce cadre, des contrôles de contamination seront effectués pour toute reprise de colis de stockage. Deux situations peuvent alors être considérées :

- le colis récupéré est dans son état initial, c'est-à-dire il conserve ses propriétés de confinement d'origine et sa résistance mécanique : aucune disposition supplémentaire n'est à mettre en place. Le colis pourra être acheminé vers l'entreposage de transit dédié aux colis de stockage ressortis du stockage souterrain et remontés en surface.
- le colis récupéré est dit douteux ou contaminé : des dispositions pourront être mises en place pour prévenir le risque de dissémination. Ces dispositions peuvent être le conditionnement des colis (type hotte étanche, qui permettra l'entreposage du colis reconditionné dans les entreposages de

[26] La capacité d'accueil des installations nucléaires de surface n'étant pas connue précisément à ce stade des études, une valeur enveloppe de 5000 colis primaire est prise en compte.

transit dédiés à la réversibilité) ou l'acheminement vers des ateliers dédiés au traitement des colis non-conformes qui disposeront d'une ventilation nucléaire spécifique (Norme ISO Internationale 17873, 2004).

Risques de dissémination de substances radioactives en fonctionnement incidentel/accidentel

Les principaux événements redoutés susceptibles de conduire à un risque de dissémination sont la chute d'un colis ou d'une charge sur un colis (cf. § 2.3.2.2), l'incendie (cf. § 2.3.2.1), l'inondation interne (cf. § 2.3.2.6) et les agressions externes comme le séisme, la chute d'avions, etc. (cf. § 2.3.3). Ces événements peuvent potentiellement entraîner une contamination des locaux où sont manutentionnés les différents colis, conduisant à une exposition interne des travailleurs et à un rejet dans l'environnement.

Mesures de prévention vis-à-vis du risque de dissémination de substances radioactives

La prévention du risque de dispersion de substances radioactives repose sur un confinement au plus près de la source. Ce confinement sera assuré par des barrières statiques. Ces barrières sont les colis primaires, les colis de stockage et les parois des enceintes (emballages de transport, cellules, locaux, hottes, puits, casemates…) contenant les colis. En effet, les colis primaires susceptibles de relâcher des radionucléides sous forme gazeuse sont autant que possible rendus étanches au gaz, sauf dans le cas où l'émission de gaz de radiolyse conduirait à des surpressions ou des concentrations non admissibles. Dans ce cas, ni les colis primaires, ni les compléments de colisage ne sont étanches, et une attention particulière sera portée à la conception des systèmes de ventilation.

Le confinement sera complété par un confinement dynamique, assuré par des systèmes de ventilation. Dans la mesure du possible, les locaux présentant les risques nucléaires les plus importants seront localisées au centre du bâtiment avec le souci du respect du principe ALARA (Selon l'article R 231-75 du code du travail, les expositions professionnelles individuelles et collectives doivent être maintenues en deçà des limites prescrites, au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre). Ainsi, les locaux présentant des risques de contamination ou d'exposition du personnel (cf. 2.3.1.2) seront inaccessibles et les opérations de manutention et de contrôle qui y seront effectuées le seront par des systèmes automatisés ou par téléopération (robots manœuvrés depuis un poste de travail derrières des hublots assurant une protection radiologique).

Les locaux seront répartis en classes de confinement en fonction du niveau prévisible de contamination atmosphérique en situation normale, incidentelle et accidentelle. Les zones de confinement et les niveaux de contamination atmosphérique associés sont, à titre indicatifs, les suivants :

- C1 : zone propre exempte, en condition normale de fonctionnement, de contamination atmosphérique. Seul un faible niveau de contamination est accepté dans des circonstances exceptionnelles,
- C2 : zone où un faible niveau de contamination atmosphérique peut être présent en fonctionnement normal. Dans des circonstances exceptionnelles uniquement, résultant d'un incident ou d'un accident, les niveaux de contamination surfacique ou atmosphérique sont modérés et tels que des dispositions appropriées doivent être prises pour en assurer la surveillance,
- C3 : zone où un faible niveau de contamination atmosphérique peut être présent en fonctionnement normal. Dans des situations particulières, consécutives à des incidents ou accidents, les niveaux de contamination sont importants et tels que des dispositions adaptées doivent être prises pour en assurer la surveillance,
- C4 : zone où les niveaux de contamination permanente et occasionnelle sont tels que l'accès est normalement interdit au personnel, sauf avec des équipements de protection appropriés.

Le nombre de limite dérivée de concentration dans l'air (LDCA) permet de définir le niveau de contamination atmosphérique d'un local et donc les dispositions de confinement associées. Le nombre de LDCA est donné par la relation :

$$\text{Nombre de LDCA} = \sum_{i}^{n} \frac{Av_i}{LDCA_i}$$

Avec :

- Av_i : Activité volumique du radionucléide i dans le local
- $LDCA_i$: Limité dérivée de concentration dans l'air du radionucléide i : elle représente l'activité volumique du radionucléide i nécessaire pour qu'une personne reçoive un équivalent de dose de 20 mSv pendant 2000 heures de travail annuel. Elle prend en considération, pour chaque radionucléide, les doses par unité d'incorporation (DPUI) fournies dans la réglementation.

Le calcul de la contamination permanente normale attendue (Cp) et de la contamination accidentelle potentielle (Ca) permet de définir les dispositions de confinement, à savoir, le nombre de niveau de filtration, le nombre d'éléments filtrants, le niveau de disponibilité de la fonction, la surveillance radiologique sur les équipements de ventilation, les possibilités de transfert d'une zone vers une autre, la possibilité de recyclage de l'air, le niveau de dépression et le renouvellement d'air minimum.

Et en fonction des classes de confinement qui seront retenues dans les différents ateliers/locaux des installations nucléaires de surface, les familles de ventilation, caractérisées par le nombre, la nature et la disposition des filtres mis en place sur les circuits de soufflage et d'extraction seront définies conformément à la réglementation (Norme ISO Internationale 17873, 2004) (cf. Tableau 2.3-1).

Tableau 2.3-1 *Exemple de classification des types de ventilation, en fonction du nombre de limite dérivée de concentration dans l'air (LDCA), comparaison avec la classification des zones de confinement*

Type de ventilation	**Contamination permanente normale attendue (Nombre de LDCA) Cp**	**Contamination accidentelle potentielle (Nombre de LDCA) Ca**	**Classes de confinement**
I	0	< 1	C1
II A	< 1	< 80	C2
II B	< 1	< 4 000	C3
III A	< 80	< 4 000	C4*
III B	< 4 000	> 4 000	C4**
IV	> 4 000	>> 4 000	C4***

Le Tableau 2.3-2 présente les classes de confinement et les types de ventilation associées envisagées au stade actuel de la connaissance des installations au regard des risques prépondérants (principalement la manutention et l'incendie) qui dimensionnent les systèmes de ventilation. Il est important de noter que les classes de confinement issues de cette première analyse reposent sur un état d'avancement de la conception et des hypothèses qui pourront évoluer lors des études ultérieures en vue de la demande d'autorisation de création. L'analyse qui a été faite sur la base d'un choix de colis représentatifs sera reprise sur l'ensemble de l'inventaire des déchets dans les phases suivantes au regard de leur sensibilité aux dangers exposés.

Tableau 2.3-2 Synthèse des classes de confinement et types de ventilation dans les zones principales de l'installation nucléaire de surface définies au stade actuel des études

Zones de l'installation nucléaire de surface	**Classes de confinement et type de ventilation associée**
Hall de réception des emballages de transport	C1/I
Locaux de préparation des emballages de transport	C1/I à C2/II A
Locaux de déchargement des colis primaires HA et MAVL	C1/I à C2/II A
Locaux de conditionnement des colis HA et MAVL	C1/I à C2/II A
Entreposage de transit des colis de stockage MAVL/HA	C1/I à C2/II A
Cellules de traitement des colis de stockage MAVL/HA non-conformes	C2/II A à C3/II B
Locaux de mise en hotte des colis de stockage MAVL/HA	C1/I à C2/II A
Entreposage de hottes MAVL/HA et accès à la galerie de transfert	C1/I à C2/II A
Zone de travail permanent (avec hublots) et couloirs de circulation du personnel (adjacents aux locaux contenant des colis primaires ou de stockage)	C1/I
Salle de conduite	C1/I

Concernant les effluents générés par l'exploitation des installations situées en surface (éventuelles eaux de lavage des locaux, eaux utilisées pour les opérations éventuelles de décontamination, eaux provenant d'une éventuelle inondation interne et les eaux d'extinction en cas d'incendie), un réseau de canalisations permettra d'évacuer ces effluents gravitairement vers des cuves de stockage. Les effluents présents dans ces cuves seront contrôlés pour détecter toute contamination.

Le confinement de ces effluents sera assuré par des canalisations étanches et résistantes à l'action physique et chimique des produits qu'elles sont susceptibles de contenir, des bacs de rétention en dessous des cuves et une surveillance de ces cuves (capteurs de niveau, détecteurs de présence d'eau dans les bacs de rétention, contrôle régulier).

Mesures de surveillance et de détection vis-à-vis du risque de contamination

Les colis qui seront reçus dans les installations de l'Andra devront respecter les normes de transport (4 Bq/cm² pour les émetteurs β, γ et 0,4 Bq/cm² pour les émetteurs α). Ces contrôles seront notamment effectués sur les emballages de transport (contrôles par frottis effectués par un opérateur), sur les colis primaires (contrôles effectués par frottis avec un robot) et sur les colis de stockage (contrôles effectués par frottis avec un robot et contrôles qualité du colis de stockage, visuel pour le colis MAVL et par ultra-sons pour la soudure du colis HA).

Le contrôle du bon fonctionnement du confinement dynamique sera assuré par le maintien des niveaux de dépression dans les locaux (manomètres), un contrôle de l'efficacité des filtres THE et une surveillance, notamment via un report des informations en salle de conduite, de l'état de fonctionnement de la ventilation (marche/arrêt des ventilateurs).

Des mesures de contamination seront également réalisées dans les locaux à risques. Un tableau de contrôle centralisera l'ensemble des informations de contrôle continu. Il aura pour mission la surveillance des états, le suivi des mesures, l'archivage et la restitution des données. Au niveau de la cheminée, l'absence de rejets de substances radioactives mises en suspension et/ou de rejets gazeux sera surveillée par :

- un contrôle continu pour les rejets d'aérosols et de gaz, le dépassement d'un seuil alerte ou d'alarme étant reporté en salle de conduite,

- un filtre fixe relevé périodiquement sur lequel sera effectué un comptage global α, β : en cas de détection d'une activité significative, une analyse par spectrométrie sera réalisée afin d'identifier les radionucléides mis en jeu.

Et enfin, le franchissement par le personnel d'une zone à une autre dans les installations se fera par des accès spécialement aménagés (sas ou points de contrôle), équipés d'appareils de détection de contamination permettant de vérifier la non-contamination des agents d'exploitation. Les matériels utilisés seront notamment des portiques de contrôle du corps entier, des contrôleurs mains/pieds, des contrôleurs de vêtements et des contrôleurs portables de contamination surfacique.

Limitation des conséquences en cas de détection d'une contamination

En cas de détection de radioactivité ou d'arrêt de la ventilation, l'installation sera mise en état sûr (notamment, les moyens de manutention seront arrêtés en position sûre et les charges affalées, les fonctions de sécurité seront reprises par l'alimentation électrique de secours, si nécessaire, les sas et les portes seront fermées, les activités seront arrêtées, etc.) et le personnel sera évacué.

2.3.1.2 Risques d'exposition externe

Le risque d'exposition externe est dû aux rayonnements ionisants émis par les substances radioactives contenues dans les déchets. Ce risque est présent dans les installations de surface, depuis la réception des colis jusqu'à leur transfert dans les hottes vers les installations souterraines, ainsi que dans les concepts d'entreposage.

Les situations pouvant être à l'origine d'un risque d'exposition externe du personnel en fonctionnement normal sont principalement les contrôles de non contamination, les ouvertures et fermetures de la partie mobile des équipements contenant des substances radioactives (hotte de transfert, portes et trappes d'accès à des cellules irradiantes) et les opérations de maintenance préventive sur les équipements des cellules irradiantes.

Mesures de prévention vis-à-vis du risque d'exposition externe

Les principales mesures de prévention et de protection permettant de s'assurer du respect des objectifs de l'Andra seront les suivantes :

- l'agencement des postes de travail et l'aménagement du processus d'exploitation,
- l'interposition d'écrans de protection fixes ou mobiles,
- l'éloignement des opérateurs vis-à-vis des sources de rayonnements,
- la limitation de la durée d'exposition de ces opérateurs,
- la mise en place d'un zonage radioprotection,
- le dimensionnement des enceintes (emballages, hottes, casemates…) contenant les colis.

De manière générale, les locaux présentant les risques nucléaires les plus importants (locaux où sont entreposés les colis primaires ou les colis de stockage) seront localisés au centre du bâtiment avec le souci du respect du principe ALARA, en limitant autant que faire se peut la présence de personnel dans ces locaux (opérations de manutention et de contrôles effectuées par des systèmes automatisés ou par des robots téléopérés).

Un zonage radiologique sera mis en place conformément à l'Arrêté du 15 mai 2006 (cf. § 1.6.2.1). Une zone est classée en zone surveillée ou contrôlée dès lors que du personnel est susceptible de recevoir, dans les conditions normales de fonctionnement, une dose efficace dépassant respectivement 1 ou 6 mSv/an. Le classement d'un local, dans lequel coexistent un risque d'exposition externe et/ou interne et un risque d'exposition des extrémités, est basé sur la valeur d'exposition la plus élevée.

Les protections radiologiques (murs, hublots…) seront dimensionnées selon les critères suivants :

- pour les zones non réglementées dans lesquelles des personnes peuvent être présentes : dimensionnement des protections à 0,5 µSv/h à 30 cm,
- pour les zones réglementées dans lesquelles des personnes peuvent être présentes en permanence (poste de travail permanent estimé à 1500 h/an) : dimensionnement des protections à 3 µSv/h à 30 cm,

- pour les zones réglementées dans lesquelles des personnes peuvent être présentes occasionnellement (cas des opérations de maintenance) : dimensionnement des protections à 15 µSv/h à 30 cm. Dans cette zone, la maîtrise de la limite d'exposition annuelle (5 mSv/an) nécessitera de contrôler le temps de présence du personnel.

Une fois les postes de travail précisés au moment de la Demande d'Autorisation de Création, le respect de la contrainte de dose de 5mSv/an sera vérifié et les postes les plus dosants identifiés.

Dans les zones réglementées, les personnes seront équipées de dosimètres (réglementaires et opérationnels si nécessaires).

Les protections des locaux de maintenance des équipements utilisés dans les cellules irradiantes seront dimensionnées pour un DED de 15µSv/h. Cette valeur permet une présence occasionnelle de personnel pour les opérations de maintenance.

D'après les données disponibles à ce stade des études (cf. § 1.6.8), le débit de dose des colis primaires MAVL peut varier, au contact de 0,1 mSv/h à environ 30 Sv/h selon le type de colis. Le débit de dose des colis primaires HA peut varier, au contact de 9 Sv/h à plusieurs centaines de Sv/h selon le type de colis et leur date de production. Les colis types représentatifs qui servent à dimensionner les installations vis-à-vis du risque d'exposition externe sont les conteneurs en acier contenant des déchets solides d'exploitation de l'AVM, colis B3.3.6 du MID 2009, pour les zones MAVL et les colis de déchets vitrifiés HA produits à La Hague, colis C1 du MID 2009, après un entreposage pour décroissance thermique de 60 ans pour les zones HA.

Le Tableau 2.3-3 présente un zonage préliminaire des zones principales des installations de surface réalisé sur la base des descriptifs des locaux, des moyens d'exploitation envisagés et des valeurs de dimensionnement retenues pour les protections radiologiques qui sont mises en œuvre à ce stade de la conception. Il est important de noter que ce zonage repose sur un état d'avancement de la conception et des hypothèses qui pourront évoluer lors des études ultérieures en vue de la demande d'autorisation de création.

Tableau 2.3-3 Zonage radiologique des locaux principaux de l'installation nucléaire de surface au stade actuel des études

Zones de l'installation nucléaire de surface	Zonage radiologique	
Hall de réception des emballages de transport	Zone surveillée à	zone contrôlée simple
Locaux de préparation des emballages de transport	Zone surveillée à	zone contrôlée simple
Locaux de déchargement des colis primaires HA et MAVL	Zone contrôlée interdite	
Locaux de conditionnement des colis primaires HA et MAVL	Zone contrôlée interdite	
Entreposage de transit des colis de stockage MAVL/HA	Zone contrôlée interdite	
Cellules de traitement des colis de stockage MAVL/HA non-conformes	Zone contrôlée interdite	
Locaux de mise en hotte des colis de stockage MAVL/HA	Zone contrôlée interdite	
Entreposage de hottes MAVL/HA et accès à la galerie de transfert	Zone surveillée à	zone contrôlée simple
Zone de travail avec hublots et couloirs de circulation du personnel (adjacents aux locaux contenant des colis primaires ou de stockage)	zone contrôlée simple	
Salle de conduite	Zone surveillée	

Des dispositions organisationnelles seront également mises en place pour prévenir le risque d'exposition externe du personnel. Ce sont notamment des évaluations prévisionnelle des doses (dosimétrie opérationnelle pour le personnel, gestion des postes par bilan dosimétrique), une

classification des travailleurs sous rayonnements ionisants avec le suivi médical adapté et une formation des travailleurs.

Une évaluation préliminaire dosimétrique a mis en évidence que les activités liées à la réception et à la préparation des emballages, et aux opérations de maintenance conduisent aux expositions les plus importantes. La dose induite pour le personnel affecté aux installations nucléaires de surface sera dans tous les cas inférieure à 5 mSv/an (objectif fixé par l'Andra), nettement en dessous de la limite réglementaire (20 mSv/an).

Mesures de surveillance et de détection vis-à-vis du risque d'exposition externe

Des contrôles de l'irradiation seront réalisés à l'aide de capteurs permettant la mesure du débit d'équivalent de dose résultant des rayonnements directement ou indirectement ionisants (gamma, neutrons). Les capteurs seront implantés dans les locaux où sont entreposés les colis primaires et/ou de stockage. Ils seront placés de façon telle qu'il n'y ait pas d'écran entre la ou les sources potentielles d'irradiation.

Une signalisation locale, sonore et lumineuse, permettra de prévenir le personnel en cas de situation anormale. Le Tableau de Contrôle des Rayonnements (TCR) sera le moyen de surveillance centralisée regroupant l'ensemble des informations de contrôle permanent issues du système de mesure.

Et, conformément à l'article R.231-96 du code du travail, les intervenants classés A ou B seront équipés d'un dosimètre passif individuel et d'un dosimètre opérationnel si nécessaire (Arrêté du 30 décembre 2004).

Limitation des conséquences d'une exposition externe

Les appareils seront équipés de seuils d'alerte et d'alarme qui permettront d'avertir le personnel d'une évolution anormale des conditions radiologiques. Le déclenchement d'une alarme entraînera l'évacuation des personnes et l'intervention du personnel spécialisé en radioprotection.

2.3.1.3 Risques de criticité

Le risque de criticité est lié à la présence de matières fissiles dans les déchets conditionnés dans les colis primaires qui seront accueillis sur les installations de surface. Cette matière fissile pourra se présenter sous des formes diverses (poudres, éclats, aiguilles de combustibles…). Leurs formes ainsi que leurs natures sont aussi diverses que les éléments de matières fissiles rencontrés dans le cycle de l'uranium au sein de la filière nucléaire française. Ainsi, la matière fissile contenue dans les colis de déchet pourra être constituée d'uranium à différents taux d'enrichissement, sous forme d'oxydes ou de métal, de plutonium ou d'un mélange de plutonium et d'uranium. D'autres radioéléments fissiles peuvent aussi être présents dans les déchets tels les transuraniens fissiles (^{237}Np, ^{241}Am, ^{242m}Am, ^{243}Am, ^{243}Cm, ^{244}Cm, ^{245}Cm).

Les données d'entrée concernant l'inventaire en matière fissile et sa forme physico chimique ainsi que la géométrie du colis primaire sont regroupées et décrites pour chaque colis type dans le modèle d'inventaire (MID). Sur la base du MID, chaque famille de colis peut être associée à un milieu fissile de référence et à une géométrie interne du conteneur. Le risque de criticité est fonction de la localisation des colis et des opérations de manutention associées, au niveau :

- des ateliers de réception, déchargement et conditionnement des colis primaires,
- des entreposages de transit des colis de stockage en attente de transfert vers le fond.

Dispositions de maîtrise du risque de criticité

Le risque de criticité sera abordé de manière similaire à celle d'une installation nucléaire de base « classique » de surface. La démonstration selon laquelle la conception des installations permet d'assurer la prévention des risques de criticité en fonctionnement normal et incidentel sera conduite selon une approche déterministe. La démonstration de sûreté prendra en compte les principes de la règle fondamentale de sûreté I.3.c (cf. § 1.6.6).

Le milieu fissile de référence adopté dans les études de criticité associées aux études de sûreté des installations de surface, pour une majorité de colis MAVL, est le plutonium métallique (100 % ^{239}Pu) modéré soit par de l'eau, soit du CH_2 en fonction de la présence ou non de matière organique dans les déchets conditionnés dans le colis primaire. Ceci permet de ne pas avoir de contrainte de garantie de la composition isotopique du Pu vis-à-vis du risque de criticité.

Les modes de contrôle pour les unités de criticité seront, a priori et majoritairement, la masse et la géométrie (du colis de stockage, des capacités d'entreposage, pas du réseau, nombre de niveaux de gerbage…).

Pour ce qui concerne le mode de contrôle par la géométrie dans les unités de criticité dans les installations de surface, celle-ci sera notamment garantie par des dispositions constructives ou d'exploitation. Par exemple :

- la conception des colis de stockage qui permet de garantir les propriétés suivantes :
  - ✓ une barrière physique : les colis de stockage MAVL de par leur conception permettent de garantir un espacement minimal incompressible entre colis primaires pendant toutes les situations d'exploitation normales ;
  - ✓ une stabilité physique : les piles de 3 colis de stockage MAVL de type pré-empilé ou de 4 colis de stockage MAVL en manutention individuelle sont stables même en cas de séismes ;
- les structures des zones d'entreposage seront dimensionnées aux séismes (comme par exemple, la stabilité et le maintien de la géométrie des puits pour la solution d'entreposage des colis HA en puits).

A cet égard, il convient de noter que les dispositions constructives de maitrise du risque de criticité seront favorisées par rapport à des consignes d'exploitation afin de réduire le risque lié au facteur humain. Par exemple, le pas des réseaux d'entreposage ou le respect du nombre de niveaux de gerbage pourront être limité mécaniquement et non par consigne.

Pour ce qui concerne le mode de contrôle par la masse, la caractérisation des colis primaires est effectuée par les producteurs qui s'assurent de leur conformité avec leurs spécifications de production. A cet égard, des contrôles seront réalisés par l'Andra afin de vérifier, par sondage, le respect des spécifications d'acceptation du stockage par les producteurs et la fiabilité des déclarations de la masse de matières fissiles. Ainsi, chaque colis primaire aura fait l'objet dans l'installation expéditrice de contrôles ou de mesures qualifiées afin de garantir notamment le respect des masses de matières fissiles par colis primaire au regard de la spécification d'acceptation du stockage. L'Andra gérera chaque unité de criticité ayant un mode de contrôle par la masse sur la base de la déclaration du producteur et de l'identification de chaque colis primaire et colis de stockage.

La conception des installations de surface et en particulier la conception de toutes les capacités d'entreposage situées en surface (par exemple, le pas des réseaux des entreposages) seront réalisées afin de garantir la maitrise du risque de criticité. De plus, elles prendront en compte les exigences sur les colis primaires et les colis de stockage issues de la gestion du risque de criticité dans les installations souterraines du stockage (en exploitation et à long terme). Ainsi, la conception des installations nucléaires de surface ainsi que leurs règles d'exploitation associées seront développées afin que les limites de masse par colis primaire et/ou colis de stockage qui seront définies pour les unités de criticité des installations de surface soient inférieures ou égales à celles retenues pour les installations souterraines.

Enfin, par disposition constructive des installations nucléaires de surface, l'arrivée d'eau sur les colis sera évitée le plus possible, voir exclue. Toutefois, il convient de noter que les démonstrations de sûreté criticité en situation normale et incidentelle sont établies sur la base de calculs réalisés à l'optimum de modération. Ainsi, cette option de sûreté est prise au titre des bonnes pratiques vis-à-vis du risque de criticité.

2.3.1.4 Risques liés aux dégagements thermiques des colis de déchets

Les dégagements thermiques ont pour origine les rayonnements ionisants émis par les substances radioactives contenues dans les colis de déchets. Ils concernent pour la plupart les colis HA dont la

puissance thermique peut varier de plus de 2000 W par colis à la fabrication à environ 500 W[27] par colis après entreposage de décroissance thermique (cas des CSD-V, colis C1 du MID 2009). Pour les colis MAVL, leur puissance thermique est relativement faible avec des valeurs comprises entre quelques watts et une centaine de watts par colis pour certains colis primaires MAVL. Les types de colis primaires MAVL qui serviront à dimensionner la ventilation des ateliers qui leurs seront dédiés sont (cf. § 1.6.8) :

- les conteneurs en béton C1PG contenant des déchets de déconstruction ou d'activité d'exploitation des réacteurs (colis B9 du MID 2009). Ces colis primaires pourraient être réceptionnés sur le centre de stockage à partir de 2065 (Andra, 2009a). A cette date, 27 % des conteneurs en béton C1PG auront une puissance thermique comprise entre 90 et 100 W, 21 % auront une puissance thermique comprise entre 10 et 90 W et 52 % auront une puissance thermique inférieure à 10 W. Le colis de stockage associé comprendra un seul colis primaire.
- les conteneurs standards de déchets compactés (colis B5 du MID 2009). Les CSD-C produits entre 2002 et 2005 ont une puissance moyenne évaluée à la production à 15 W, 5 % de ces colis ont une puissance thermique comprise entre 25 et 40 W, 37 % ont une puissance thermique comprise entre 15 et 25 W et 58 % ont une puissance thermique inférieure à 15 W. Leur âge à la réception sur le centre de stockage sera probablement de l'ordre de 20 à 30 ans, voire plus (Andra, 2009a). Les puissances thermiques auront alors fortement diminué, compte tenu de la part prédominante du Co60. Les colis de stockage associés sont constitués de 4 ou de 8 colis primaires.

Dans certaines conditions, les dégagements thermiques peuvent conduire à une dégradation des colis et/ou à une dégradation des locaux (voiles bétons) assurant le confinement des substances radioactives et la protection radiologique du personnel.

Mesures de prévention

Les systèmes de ventilation seront dimensionnés afin d'assurer le refroidissement des locaux abritant des colis à fort dégagement thermique (principalement pour les entreposages de transit et les concepts d'entreposages des colis). Les exigences de dimensionnement retenues par l'Andra sont les suivantes :

- la température limite à ne pas dépasser pour le béton (colis primaires MAVL avec coques béton, colis de stockage MAVL et murs) est de 70°C en situation normale d'exploitation (fonctionnement permanent) et de 80 °C en situation incidentelle/accidentelle. Au-delà de ce seuil, la stabilité des composants du béton change. En effet, lors du refroidissement, les espèces présentes conduisent à la formation de trisulfoaluminates expansifs (ettringite) et donc à un risque de fissuration à terme,
- la température limite à ne pas dépasser pour le bitume (colis primaires MAVL d'enrobés bitumineux) est de 40°C en situation normale d'exploitation (fonctionnement permanent) et de 50°C en situation incidentelle (absence de ventilation). Au-delà de ce seuil, l'élévation de la température affecte la rhéologie des enrobés bitumes (sédimentation des sels présent dans les enrobés conduisant à une inhomogénéité macroscopique des colis qui peuvent modifier le comportement sous-irradiation et ultérieurement, l'altération par l'eau),
- la température limite admissible pour les colis primaires HA est de 450°C à cœur du verre en conditions normales d'exploitation et de 500°C en conditions incidentelles/accidentelles. Elle concerne une modification des caractéristiques de la matrice verre (température de transition vitreuse),
- la température ambiante de l'air dans les locaux ne doit pas dépasser 50°C s'il y a présence de matériel électronique (surveillance des fonctions de sûreté).

Les systèmes de ventilation assurant l'évacuation de la puissance thermique des locaux à risques (notamment les locaux où seront entreposés des colis exothermiques) seront secourus électriquement. Des calculs complémentaires seront réalisés dans une phase ultérieure (post Jalon 2009, notamment lorsque les plans de masse des installations seront définis) pour juger de la nécessité d'une ventilation permanente, sauvegardée (notamment, dimensionnement au séisme), dans certains locaux.

Mesures de surveillance et de détection

Les locaux à risques seront équipés de capteurs pour la surveillance de l'ambiance, de l'hygrométrie, de la concentration en hydrogène, etc. Leur température limite de fonctionnement sera également prise en compte pour le dimensionnement de la ventilation.

[27] Voire 200 W si de tels besoins venaient à être identifiés.

Limitation des conséquences

En cas d'élévation anormale de la température dans les locaux à risque ou de perte de la ventilation (cf. § 2.3.2.7), l'installation sera mise en état sûr (notamment, arrêt des opérations de manutention et affalage des charges, basculement des systèmes de ventilation sur l'alimentation électrique de secours ou mise en œuvre de moyens mobiles de ventilation, si nécessaire) et le personnel sera évacué.

2.3.1.5 Risques liés aux dégagements de gaz de radiolyse

Le phénomène de radiolyse se produit lorsque les rayonnements ionisants (alpha, bêta, gamma et neutrons) et des substances hydrogénées (eau contenue dans les matrices ciments) ou organiques (bitume) sont simultanément mis en présence. Lors des collisions entre les particules incidentes et les constituants de la matière, l'énergie transférée par diffusion peut rompre certaines liaisons chimiques et ainsi former de nouvelles molécules stables gazeuses : H_2, HCl, CH_4, etc.

Un certain nombre de colis de déchets MAVL émet des gaz de radiolyse. Ces gaz sont majoritairement l'hydrogène (plus de 90% du dégagement gazeux) et, en moindre proportion, le méthane. Les colis représentant les dégagements d'hydrogène les plus importants sont les suivants (cf. § 1.6.8) :

- les fûts d'enrobés bitumineux de la STEL et de STE3 (colis B2.2, B2.3 et B2.5 du MID 2009) dont les relâchements d'H_2 sont inférieurs à 10 l/fût/an,
- les conteneurs amiante ciment (CAC) et les conteneurs béton-fibres (CFBC'2) de déchets solides d'exploitation (colis B3.1.2 du MID 2009) dont les relâchements d'H_2 sont estimés à 10 l/fût/an,
- les conteneurs en béton C1PG contenant des déchets de déconstruction ou d'activité d'exploitation des réacteurs (colis B9 du MID 2009) dont la production calculée d'hydrogène par colis est inférieure à 20 l/fût/an (le pic de production est atteint au bout d'environ 5 ans) et les relâchements d'H_2 à la date de réception sur le centre de stockage (2065) sont estimés à 10 l/fût/an,
- les fûts de coques et embouts cimentés (colis B4.1 du MID 2009) dont les relâchements d'H_2 seront de l'ordre de l'ordre de 120 l/fût/an entre 2005 et 2025, de l'ordre de 20 l/fût/an à partir de 2045.

Les conséquences potentielles de ces dégagements de gaz de radiolyse sont :

- la formation d'atmosphères explosives dans l'enceinte où sont placés les colis : une explosion peut survenir, en présence d'une source d'ignition, si la concentration dans l'air du gaz dépasse sa Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) ; la LIE est de 4% pour l'hydrogène et de 5% pour le méthane,
- la surpression au sein du colis de stockage pouvant conduire à sa rupture (voire explosion) en fonction de sa capacité à évacuer les gaz produits.

Dans les installations, lorsque des substances susceptibles de former un mélange explosif sont des gaz ou des vapeurs inflammables, leur concentration sera maintenue à la plus faible valeur possible pour respecter les objectifs de protection vis-à-vis des gaz de radiolyse (cf. § 1.6.5) c'est-à-dire à :

- 25 % de la LIE dans l'ensemble des installations, soit 1 % de H_2,
- 10 % de la LIE si des personnes travaillent dans l'atmosphère (postes permanent et également occasionnels), soit 0,4 % de H_2.

Mesures de prévention du risque d'explosion lié aux dégagements de gaz de radiolyse par les colis

Afin de prévenir le risque d'explosion, la ventilation des locaux sera dimensionnée (débit de ventilation, fiabilité et redondance des systèmes de ventilation et des moyens d'alimentation…) de façon à respecter une concentration dans l'air de gaz explosifs toujours inférieure aux seuils mentionnés ci-dessus. L'absence de zones « mortes » (qui présentent un risque d'accumulation de gaz explosifs) est privilégiée.

Et, de façon à prévenir un risque de surpression au sein des colis de stockage qui seront entreposés, il est prévu d'évacuer l'hydrogène par le béton du couvercle et/ou de la paroi du colis (formulation particulière du béton), voire par des évents positionnés dans le haut du corps du colis si nécessaire.

- ***Cas particulier de la hotte de transfert***

Les hottes de transfert n'étant pas ventilées mécaniquement, la vérification de l'absence d'accumulation d'une quantité significative d'hydrogène à l'intérieur sera réalisée pour chaque type de colis et à la fois sur le temps nécessaire pour le transfert des colis vers les installations souterraines (fonctionnement normal) mais aussi en cas d'immobilisation prolongée de la hotte (incident).

En fonctionnement normal, la formation d'une zone explosive à l'intérieur de la hotte sera prévenue par conception au travers des jeux de construction des portes et de la présence d'un évent en partie haute, si nécessaire. L'hydrogène rejeté est dilué par les flux de ventilation circulant dans les installations de transfert.

Mesures de surveillance liées à la formation d'atmosphères explosives

Des dispositifs de surveillance des installations seront mis en place notamment vis-à-vis du taux d'hydrogène dans les locaux d'entreposage de transit des colis de stockage :

- les capteurs seront réglés pour déclencher à des valeurs inférieures à la réglementation qui restent à définir afin de disposer de marges,
- la surveillance du débit de ventilation et des défauts des systèmes de ventilation permettra d'asservir le fonctionnement des équipements de manutention et des véhicules de transfert des hottes au fonctionnement de la ventilation.

En cas de dépassement des seuils d'alarmes (sur le taux d'hydrogène et/ou le débit de ventilation), l'installation sera mise en état sûr (notamment, arrêt des opérations de manutention et affalage des charges, basculement des systèmes de ventilation sur l'alimentation électrique de secours ou mise en œuvre de moyens mobiles de ventilation complémentaires, si nécessaire) et le personnel sera évacué.

Limitation des conséquences d'une explosion

La nécessité de dispositions de protection ou de limitation des conséquences d'une explosion a été analysée, au titre de la défense en profondeur, en considérant que les dispositions de prévention et de surveillance retenues étaient défaillantes. L'évaluation des conséquences d'une explosion au sein d'un colis de stockage (la démonstration sur les colis primaires étant déjà apportée par les producteurs) a été réalisée pour identifier son effet potentiel sur la tenue mécanique des composants sollicités.

Les calculs réalisés ont retenu des hypothèses enveloppes sans lien avec des situations réelles au regard de la faible quantité d'hydrogène relâchée par les colis de stockage. L'évaluation de l'endommagement d'un colis suite à une explosion interne au colis de stockage a considéré que les vides internes (colis de stockage, colis primaire) étaient remplis d'un mélange air/hydrogène aux proportions stœchiométriques, que le point d'ignition était positionné pour maximiser la surpression et qu'il n'y avait pas d'amortissement de l'explosion lié à la présence de l'enveloppe du colis primaire.

Les résultats des calculs montrent que, globalement, lorsque l'explosion s'initie à l'intérieur de la cavité close du fût primaire, au sommet du déchet, elle ne génère aucun dégât important sur la structure du colis primaire, mais il existe un risque de dessertissage du bouchon. Concernant l'explosion au sein du colis de stockage, le béton du colis est fissuré tandis que la déformation des armatures reste en deçà des limites de rupture. Aucune présence de fissure traversante sur les parois du colis de stockage n'est constatée ; il n'y a pas ruine du conteneur. Les colis de stockage ne sont donc que faiblement endommagés : il n'y a pas d'atteinte du colis primaire et le colis de stockage reste intègre.

Des calculs sur l'entreposage de transit des colis de stockage MAVL dans les installations de surface seront réalisés d'ici la demande d'autorisation de création lorsque ce dernier sera défini plus précisément (notamment pour ce qui concerne le mode et la capacité d'entreposage) dans le but de démontrer la stabilité des piles de colis, s'il y a empilement, afin d'écarter le risque de chute de colis et la tenue des protections radiologiques (murs, hublots,...) afin d'écarter le risque d'exposition des personnes.

2.3.2 Risques non nucléaires d'origine interne

2.3.2.1 Risques d'incendie

L'occurrence d'un incendie nécessite la présence simultanée de matériaux combustibles, d'une source d'ignition et de comburant en quantité suffisante. Un incendie peut entraîner la dégradation, voire la perte d'une fonction de sûreté.

La maîtrise du risque incendie repose sur la mise en œuvre d'une démarche de conception incluant l'optimisation des installations et des équipements au travers de l'application des textes réglementaires en vigueur pour les installations nucléaires de base. Il s'agit notamment d'appliquer les recommandations de l'Arrêté du 31 janvier 2006, du guide de l'autorité de sûreté relatif à l'application de cet arrêté (ASN/GUIDE/7/01) et de la RFS I.4.a (Règle Fondamentale de sûreté relative à la protection contre l'incendie).

L'étude préliminaire des risques d'incendie a montré que les installations de surface du centre de stockage présentent un risque d'incendie maitrisé sous réserve de la mise en œuvre de dispositions techniques et organisationnelles décrites ci-après. Les colis types représentatifs qui servent à dimensionner les installations vis-à-vis des risques liés à l'incendie sont les fûts d'enrobés bitumineux, colis B.2 du MID 2009 (cf. § 1.6.8). L'acheminement des emballages sur lorrys depuis le terminal ferroviaire jusqu'au hall de réception des emballages par des engins diesels (solution du Dossier 2005) présente les opérations qui peuvent générer les incendies les plus importants. Une solution alternative pourrait être envisagée d'ici la Demande d'Autorisation de Création. Les locaux qui présentent les risques d'incendie susceptibles de contaminer les installations et de relâcher des substances radioactives dans l'environnement concernent les lignes de déchargement et de conditionnement des colis primaires, ainsi que la capacité d'entreposage de transit des colis de stockage MAVL. Il n'a pas été identifié de risque particulier dans la zone de réception et de préparation des colis HA dans la mesure où il est fait l'hypothèse que les colis de stockage HA ne sont pas mobilisables en situation d'incendie. Cependant, cette hypothèse devra être analysée au regard de l'ensemble de l'inventaire. A ce stade des études, les options de sûreté retenues vis-à-vis du risque d'incendie pour la conception des zones MAVL seront appliquées à la conception des zones HA.

L'analyse du risque d'incendie sera approfondie dans une phase ultérieure (post-Jalon 2009, notamment lorsque les plans de masse des installations seront définis). Les grandes options adoptées pour limiter le risque d'incendie sont présentées ci-après.

Mesures de prévention vis-à-vis du risque de départ de feu

On cherchera à limiter, voire éliminer l'utilisation et l'entreposage de matériaux combustibles et inflammables, en favorisant la meilleur qualification au feu des matériaux et en réduisant autant que possible les sources d'allumage potentielles.

Les sources d'ignitions seront tenues éloignées des matériaux combustibles ; le cas échéant, des écrans adéquats seront mis en place. Si nécessaire, les entreposages de matériaux inflammables s'effectueront dans des zones isolées spécifiquement définies, dans lesquelles les sources d'ignition sont réduites au minimum (éclairage, surveillance et moyens de communication).

De préférence, on utilisera des matériaux non ou difficilement inflammables (de classe M0 pour les structures et de classe M1 ou M2 pour les équipements). Les câbles électriques utilisés seront de classe C1 a minima (non propagateur de flamme et ne dégageant pas de substances volatiles en quantités suffisantes pour entretenir un second foyer lorsqu'ils sont soumis à la flamme) et CR1 pour la détection incendie.

Les réseaux de gaz inflammables ou de comburants (oxygène, air comprimé) seront limités en préférant l'utilisation de bouteilles de volume limité. L'implantation et le cheminement de ces réseaux s'effectueront en tenant compte de la sectorisation incendie.

Mesures de surveillance et de détection de l'incendie

Un système de Détection Automatique d'Incendie (DAI) sera installé de façon à assurer une surveillance permanente des installations « sensibles ». Les détecteurs utilisés seront compatibles avec la nature

des feux potentiels et avec l'ambiance des locaux concernés (prise en compte du débit de dose, des débits de ventilation, des niveaux de température…). Le nombre de détecteurs sera adapté à la taille des locaux à surveiller.

En cas de détection, une alarme sera émise au poste de commande. Un automate initiera les actions à engager (extinction, ventilation…). Le détecteur en alarme sera identifiable depuis le poste de commande et un indicateur d'action en local permettra de facilement le localiser (système de détection adressable, conformément à la réglementation en vigueur). Le système sera alimenté de façon permanente (batterie + onduleur). En cas de défaut sur un des composants du système, un signal sera émis au niveau du poste de commande.

Limitation des conséquences de l'incendie

Enfin, la limitation des conséquences d'un incendie sera basée sur la mise en œuvre de dispositions organisationnelles et constructives permettant de garantir le confinement du feu dans le local sinistré. Ces dispositions seront notamment les suivantes :

- ***Lutte contre l'incendie***

Des moyens de lutte adaptés seront mis en place. Un réseau d'équipements mobiles de première intervention (extincteurs) et un Réseau Incendie Armé (RIA) seront mis à disposition dans l'ensemble des installations. Les agents extincteurs utilisés tiendront compte de la nature des risques présents. Dans les locaux sensibles d'accès difficile (irradiation, contamination, température, encombrement…), des systèmes d'extinction fixes actionnables à distance seront mis en place si besoin. Selon les conclusions de l'analyse incendie, le déclenchement de ces systèmes pourra être automatique et/ou manuel. Le risque d'inondation interne par les eaux d'extinction sera pris en compte. Des systèmes de collecte des eaux d'extinction de capacité suffisante seront prévus dans les installations (seuils de porte, rétentions). Les eaux d'extinction seront ensuite acheminées vers un bassin ou une cuve spécialement aménagés et seront évacuées hors du site après réalisation d'un contrôle radiologique et toxicologique.

- ***Limitation de la propagation du feu***

La non-propagation de l'incendie est basée sur la mise en œuvre de dispositions constructives permettant de garantir le confinement du feu dans la zone sinistrée. Le degré coupe-feu des secteurs de feu (voiles béton) sera en adéquation avec la durée du feu plausible et les délais nécessaires pour maîtriser l'incendie (prise en compte des conditions d'accès et d'ambiance). Ce degré coupe-feu sera reconstitué au niveau des portes et des traversées des secteurs de feu.

Des secteurs de confinements seront reconstitués autour des secteurs de feux pouvant être à l'origine de relâchements de substances radioactives pouvant engendrer des conséquences inacceptables. Leur accès s'effectuera par des sas ventilés.

Les systèmes de ventilation alimentant les secteurs de feu seront équipés de systèmes d'isolement (clapets coupe-feu) et de moyens de surveillance permettant leur gestion, à distance, depuis le poste de commande. Les principes retenus pour la gestion des systèmes de ventilation sont les suivants :

- maintenir le confinement des substances radioactives à l'intérieur des secteurs de feu et de confinement le plus longtemps possible, tant que l'intégrité du Dernier Niveau de Filtration (DNF) n'est pas menacée, grâce à un suivi des paramètres fournis par les capteurs de surveillance. L'analyse détaillée permettra de décider si la fermeture des clapets coupe-feu sur les gaines d'extraction s'effectuera manuellement sur décision des équipes d'intervention ou automatiquement ;
- limiter l'intensité du feu à l'intérieur des secteurs de feu en limitant l'apport de comburant par la fermeture des clapets coupe-feu implantés sur les gaines d'admission dès la détection d'un départ de feu ;
- empêcher la propagation du feu en dehors des secteurs de feu par la fermeture des clapets coupe-feu à l'extraction lorsque les limites de manœuvrabilité de ceux-ci et/ou la limite de tenue des composants sont atteintes.

- ***Maintien des fonctions de sûreté***

Afin de garantir le maintien des fonctions de sûreté en cas d'incendie, les barrières de confinement seront séparées de façon à ce qu'un incendie ne puisse pas conduire à la perte de l'ensemble des barrières, les systèmes assurant le confinement dynamique (équipements « actifs ») seront redondants et alimentés par des voies électriques différentes (avec séparation des cheminements et sectorisation incendie) et les protections radiologiques seront constituées de matériaux non ou difficilement inflammables et de structures résistantes au feu.

De plus, afin de limiter les conséquences d'un incendie se développant à l'extérieur de l'installation, il est prévu d'interdire le stationnement (pour les camions) ou l'entreposage de charges combustibles à proximité des ouvertures permettant l'alimentation en air des systèmes de ventilation.

2.3.2.2 Risques liés aux opérations de manutention

Les risques induits par les opérations de manutention sont potentiellement la chute ou le choc d'un colis contenant des substances radioactives, la chute **ou le choc** d'une charge manutentionnée sur un colis ou sur un équipement participant à une fonction de sûreté et la collision entre deux engins de manutention ou avec une porte.

Les conséquences potentielles d'une chute/choc ou d'une collision sont :

- la dissémination de substances radioactives en cas de libération de substance contenues dans le colis manutentionné ou dans l'équipement sur lequel la charge a chuté. La chute d'un colis de déchets peut conduire à une dissémination de substances radioactives, dans le cas où la hauteur de chute est supérieure à la hauteur de résistance à la chute du colis. Le risque de dissémination peut également être induit par la collision de colis en cours de transfert (ou par la collision d'engins de manutention).
- la destruction ou l'atteinte d'une fonction importante pour la sûreté ou de structures du bâtiment (dalle, murs..) et l'exposition externe du personnel en cas d'endommagement d'un équipement participant à la fonction de protection radiologique (hotte, écran…).

A ce stade des études, les colis types représentatifs retenus pour le dimensionnent des installations vis-à-vis des risques liés aux opérations de manutention (absence de justification de résistance à la chute d'une valeur inférieure à 5 mètres, cf. § 1.6.8) sont :

- les fûts d'enrobés bitumineux de la STEL et de STE3 (colis B2.2, B2.3 et B2.5 du MID 2009),
- les conteneurs amiante ciment (CAC) et les conteneurs béton-fibres (CFBC'2) de déchets solides d'exploitation (colis B3.1.2 du MID 2009),
- les fûts de déchets technologiques métalliques (et organiques) d'exploitation et de démantèlement bloqués dans un liant hydraulique (colis B3.3.7 du MID 2009),
- les fûts en acier de boues de filtration cimentées en coques béton (colis B3.4.1 du MID 2009),
- les fûts de coques et embouts cimentés (colis B4.1 du MID 2009),
- les conteneurs en béton C1PG contenant des déchets de déconstruction ou d'activité d'exploitation des réacteurs (colis B9 du MID 2009).

Les locaux qui présentent les risques de chute ou de collision susceptibles de contaminer les installations et de relâcher des substances radioactives dans l'environnement sont :

- les ateliers de déchargement des emballages de transport (colis primaires HA et/ou MAVL),
- les ateliers d'entreposage de transit des colis de stockage MAVL ou les colis de stockage peuvent potentiellement être empilés.

<u>Mesures de prévention des risques liés aux opérations de manutention</u>

Les moyens de manutention seront conçus et dimensionnés, selon les règles de la Fédération Européenne de la Manutention (FEM) en vigueur, en fonction des charges à manutentionner, et notamment de leur masse et géométrie, des sollicitations envisagées (accélération, vitesse, nombre de manutentions, etc.). Ce dimensionnement tient compte de l'environnement (installation, extérieur, etc.) et du processus d'exploitation (notamment, cheminement envisagé) des colis (primaires ou de

stockage) ainsi que des conditions de fonctionnement normal et incidentel/accidentel (séisme, par exemple).

Les moyens de manutention envisagés privilégieront la limitation de la hauteur de levage des colis primaires et de stockage ; c'est notamment le cas pour les opérations de chargement des colis primaires MAVL dans leurs conteneurs de stockage (utilisation d'une table élévatrice pour descendre les colis primaires au niveau du local de chargement des conteneurs de stockage).

Concernant l'acheminement des colis jusqu'aux ateliers de réception des emballages, le transport par voie ferrée (train) constitue à priori le moyen de transport le plus fiable (le risque d'explosion/incendie peut être écarté par rapport au transport routier et le risque d'accident est plus faible). Toutefois, le moyen de transport qui sera finalement retenu pour l'acheminement des colis sur le site jusqu'aux ateliers de réception des emballages ne pourra être déterminé qu'après le choix de la zone d'implantation des installations de surface (post-Jalon 2009).

Concernant la manutention à l'intérieur des installations, l'aménagement des locaux inclura dès la conception l'espace nécessaire aux cheminements. Les options techniques pour le cheminement envisagées limiteront au strict minimum les survols des colis. Un plan de circulation sera établi de façon à limiter les croisements et les voies seront maintenues dégagées de tout obstacle. Les portes d'accès entre les locaux où circuleront des engins de manutention seront équipées d'un système de sécurité empêchant la fermeture des portes en cas d'obstruction.

Les systèmes de manutention seront équipés des sécurités nécessaires (solutions envisagées : fins de course, freins, doubles câbles,...). En cas de perte d'énergie, le maintien de la charge sera assuré. Le redémarrage au retour de l'énergie nécessitera une action volontaire manuelle.

Pour qui concerne l'exploitation, les opérations de manutention seront autant que possible automatisées. Seuls les colis contenant des substances radioactives pourront être manutentionnés au-dessus d'autres colis contenant des substances radioactives (aucune autre charge, telle que les conteneurs de stockage vides, ne sera manutentionnée au-dessus de colis contenant des substances radioactives. La hauteur de gerbage des colis sera limitée ; cela ne concerne qu'éventuellement l'entreposage de transit des colis de stockage MAVL (solution non figée à ce stade des études) et les concepts d'entreposage complémentaires à l'étude.

Un programme d'entretien, de surveillance et de maintenance des engins de manutention sera mis en place. En dehors des périodes d'utilisation (notamment, pour maintenance), des positions de garages seront définies.

Mesures de surveillance et de détection vis-à-vis des risques liés à la manutention des colis

Les engins de manutention seront équipés de dispositifs de détection (survitesse, défaut de synchronisme, fin de course, anticollision, détection d'obstacle) qui permettent de détecter une défaillance ou événement non prévu et d'arrêter le mouvement en cas d'occurrence.

Par ailleurs, toutes les opérations de manutention seront surveillées par un téléopérateur.

Des balises de contamination permettront de détecter une dissémination de substances radioactives anormale (potentiellement, une chute de colis ou une chute de charge sur un colis) dans les locaux où seront manutentionnés les colis.

Limitation des conséquences d'une chute de colis

Afin de limiter les conséquences d'une chute de colis, ceux-ci seront manutentionnés, autant que possible, à des hauteurs compatibles avec les hauteurs de résistance à la chute des colis.

La limitation des conséquences d'une chute reposera également sur les dispositions suivantes :

- le confinement statique et dynamique des locaux ; Une ventilation nucléaire sera installée dans l'ensemble des locaux identifiés à risque (les calculs de LDCA seront réalisés dans une phase post-Jalon 2009),
- l'absence de poste de travail pour le personnel dans les locaux identifiés à risque.

Si nécessaire, des dispositions seront prévues pour permettre la reprise de colis endommagés : les moyens de manutention dans les locaux à risque seront dimensionnés pour permettre de reprendre les colis après une chute.

Dans les locaux où la dalle participe au confinement statique, celle-ci sera dimensionnée à la chute de colis menant à son endommagement maximal.

En cas d'endommagement de protections radiologiques, le personnel devra évacuer la zone et des dispositions seront mises en place pour interdire l'accès à cette zone (balisage, etc.). L'intervention pour réparation sera définie de façon à minimiser l'exposition du personnel conformément au principe ALARA.

De plus, les réseaux d'alimentation en énergie et fluides seront positionnés hors d'atteinte des engins (collision) et des colis (chute).

2.3.2.3 Risques d'explosion

Les sources de danger vis-à-vis du risque d'explosion sont principalement la présence d'appareils sous pression et le dégagement d'hydrogène lors de la charge des batteries. Les risques liés au dégagement d'hydrogène par radiolyse des colis ont été présentés dans le § 2.3.1.5.

Les conséquences potentielles d'une explosion sont des blessures du personnel, l'endommagement ou la destruction de matériels et d'équipements (notamment l'endommagement d'une barrière de confinement ou d'une barrière de protections radiologiques conduisant à un risque de dissémination et/ou d'exposition externe).

Mesures de prévention vis-à-vis du risque d'explosion

Concernant l'utilisation d'appareils sous pression, des dispositions classiques de prévention (appareils conformes à la réglementation, maintenance préventive des appareils, mise en place de moyens adéquats de purge et de ventilation, formation du personnel) seront mises en œuvre.

Concernant la présence de batteries, la prévention du risque d'explosion lié à la charge des batteries repose sur le respect de la réglementation en vigueur (Arrêté du 29 mai 2000), notamment sur l'utilisation de batteries étanches et une ventilation adaptée de l'atelier de charge.

Mesures de surveillance et de détection

Les contrôles périodiques et le programme de maintenance préventive permettront de s'assurer du bon fonctionnement des équipements.

En fonction de la conception des ateliers de charge des batteries, il sera installé, soit des détecteurs d'hydrogène (avec charge des batteries interrompue en cas de dépassement de seuil), soit un système d'asservissement du fonctionnement de la station de charge au fonctionnement du système de ventilation du local.

Limitation des conséquences d'une explosion

Les bouteilles de gaz seront installées sur une aire aménagée à l'extérieur des bâtiments contenant des substances radioactives. Si nécessaire, des dispositifs de sécurité (soupapes, disques de ruptures, automatismes de régulation de l'alimentation et/ou de la ventilation des appareils, murs de protection…) seront mis en place afin de limiter les effets d'une surpression.

De même, l'atelier de charge des batteries sera implanté à distance des ateliers contenant des colis ou des équipements important pour la sûreté afin de limiter les conséquences d'une potentielle explosion.

2.3.2.4 Risques chimiques liés aux relâchements de gaz toxiques, corrosifs ou irritants

Le risque potentiel d'origine chimique, pour les installations de surface et les concepts d'entreposage, a pour principales origines :

- les gaz d'échappement des engins diesel acheminant les lorrys dans le hall de réception des emballages de transport (dans le cas où la solution présentée dans le Dossier 2005 serait maintenue par la suite),
- les gaz toxiques émis par les colis MAVL liés au phénomène de radiolyse, notamment le monoxyde et le dioxyde de carbone (risque d'anoxie) émis par les fûts d'enrobés bitumineux (colis B2 du MID 2009),
- tous les produits chimiques susceptibles d'être utilisés dans l'installation (décapants, produits de nettoyages, huiles moteurs, lubrifiants mécaniques…) et entreposés.

Les conséquences potentielles pour l'homme sont l'intoxication, l'irritation des muqueuses, l'asphyxie et l'exposition à des produits cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction (CMR). Par ailleurs, le mélange de produits chimiques incompatibles peut conduire à des situations accidentelles (incendie, explosion, échauffement…).

Mesures de prévention vis-à-vis des risques liés aux relâchements de gaz toxiques, corrosifs ou irritants

Concernant les gaz toxiques et irritants, une vérification de l'absence de dépassement des valeurs limites d'exposition professionnelle issues de la réglementation sera réalisée (post-jalon 2009, lorsque les quantités de colis présents ainsi que les dimensions des locaux accueillant des colis seront déterminés). Le personnel n'interviendra pas en fonctionnement normal dans les locaux où le risque de relâchement de gaz toxiques ou irritants sera élevé. Le risque d'exposition du personnel aux gaz d'échappement ne pouvant pas être écarté dans le hall de réception des emballages de transport à ce stade des études, des dispositions seront prises pour éviter l'accumulation de gaz d'échappement dans le hall (solution envisagée : sas camion avec extracteur de gaz d'échappement).

Concernant les produits chimiques (décapants, produits de nettoyage, huiles moteurs, lubrifiants mécaniques…), des dispositions classiques de prévention (limitation des quantités, classification, étiquetage et emballage des substances et des mélanges, respect des consignes d'entreposage décrits dans la Fiche de Données de Sécurité Produit et formation du personnel) seront mises en œuvre.

Mesures de surveillance et de détection

La surveillance des produits chimiques consistera à contrôler les quantités présentes et les conditions d'entreposage des produits dans les locaux.

Limitation des conséquences

La limitation des conséquences reposera sur l'utilisation de matériaux absorbants en cas de dispersion de produits chimiques et sur l'utilisation d'équipements de protection adaptés. Les déversements accidentels et/ou les fuites de produits seront récupérés dans des bacs de rétention adaptés conformément à l'Arrêté du 31 janvier 2006 et si nécessaire, en fonction des produits utilisés, des dispositifs permettant de limiter les conséquences pour les personnes seront mis en place (douches, dispositifs de rinçage oculaire, etc.).

2.3.2.5 Risques liés aux dégagements thermiques d'origine non nucléaire

Les principales sources de dégagements thermiques d'origine non nucléaire dans les installations situées en surface seront les suivantes :

- les moteurs (engins de manutention, les systèmes de ventilation, les véhicules de transports…),
- le poste de soudure à faisceau d'électrons (utilisé lors du conditionnement des colis primaire HA en colis de stockage),
- les équipements électriques (poste de transformation, tableaux électriques, onduleurs, batteries, etc.),
- les installations de chauffage ou de climatisation.

Les dégagements thermiques peuvent potentiellement conduire à un dysfonctionnement des équipements électriques/électroniques (contrôle commande, capteurs de surveillance…), un départ d'incendie ou à une dissémination de substances radioactives par dégradation d'une barrière de

confinement. Néanmoins, au vu des appareils qui seront mis en œuvre, il semble peu probable que l'élévation de température puisse conduire à ces conséquences significatives.

Mesures de prévention vis-à-vis des risques liés aux dégagements thermiques

Les principales mesures de prévention seront :

- le choix de la puissance des appareils en fonction des actions à réaliser afin d'éviter la surchauffe des appareils par une utilisation excessive ou une utilisation non adaptée,
- le dimensionnement des systèmes de ventilation qui permettent d'assurer le refroidissement des locaux abritant des moteurs, des équipements électriques ou encore le poste de soudure à faisceau d'électrons,
- l'asservissement du système de refroidissement du poste de soudure au fonctionnement de l'appareil de soudage,
- l'installation de certains équipements (poste de transformation) à l'extérieur des bâtiments.

Mesures de surveillance et de détection

Une maintenance régulière (contrôles périodiques) des équipements permettra de surveiller leur bon fonctionnement.

Des détecteurs incendie seront installés dans les locaux et permettront de détecter un éventuel départ de feu. En cas de départ de feu, des moyens d'intervention adéquats permettront de maîtriser et d'éviter la propagation de l'incendie (cf. § 2.3.2.1).

Si les installations présentent des locaux sensibles à une élévation de température (locaux contenant des équipements de contrôle commande, locaux électriques…), ceux-ci pourront être équipés d'une mesure de température asservie à la ventilation.

2.3.2.6 Risques d'inondation interne

Une inondation d'origine interne, liée à la présence d'eau (eau du réseau classique de distribution, eau déminéralisée, eau de refroidissement, eau incendie, effluents) peut résulter :

- d'une fuite sur une tuyauterie ou un équipement suite à une défaillance intrinsèque (défaut de soudure), une corrosion ou des agressions (chocs, etc.),
- d'un débordement d'une capacité de rétention.

Les conséquences potentielles d'une inondation d'origine interne sont notamment une dissémination de substances radioactives (épandage d'effluents radioactifs ou mise en solution de l'éventuelle contamination surfacique labile) ou des courts-circuits sur les équipements électriques.

Mesures de prévention vis-à-vis du risque d'inondation interne

Les dispositions de prévention qui seront mise en œuvre sont les suivantes :

- choisir des matériaux étanches et résistants à l'action physique et chimique des fluides transportés ou contenus,
- éviter la présence de canalisations ou de réserves d'eau dans les locaux contenant des colis de déchets radioactifs,
- entretenir et contrôler périodiquement les réseaux (canalisations, rétentions…) de fluides et d'effluents, et nettoyer régulièrement les sols.

Mesures de surveillance et de détection d'une inondation

La présence de détecteurs de niveau sur les cuves (entreposage tampon d'eau déminéralisée et entreposage des effluents douteux ou actifs) et de présence de liquide dans les rétentions, avec alarme, permet de détecter une présence ou une quantité anormale d'eau dans les installations.

Par ailleurs, des contrôles périodiques sont effectués pour s'assurer du bon état des réseaux et de l'étanchéité des bacs de rétention (Arrêté du 31 janvier 2006).

Limitation des conséquences

Des vannes d'arrêt seront installées sur les canalisations et un système de récupération de fuites sera mis en place sous les volumes de stockage ou d'entreposage d'eau et d'effluents douteux ou actifs.

De plus, dans les locaux identifiés à risque, les équipements électriques (source d'incendie par court-circuit) et les colis de déchets (source de dissémination de substances radioactives) pourraient être surélevés ou protégés.

2.3.2.7 Risque lié à la perte d'auxiliaires (alimentation électrique, conduite de l'installation, systèmes de ventilation, moyens de contrôles et de surveillance...)

Alimentation électrique

La perte de l'alimentation électrique peut provenir de la perte de l'alimentation électrique du site, d'un défaut d'équipement électrique (armoires, câbles, etc.) ou d'une agression (incendie, etc.). La perte de l'alimentation électrique peut conduire à une perte de la ventilation, des moyens de manutention et/ou des moyens de détection/surveillance et de contrôle-commande.

La prévention repose sur la conformité des installations et du matériel, sur le contrôle périodique des installations électriques et sur la redondance des alimentations électriques.

A ce stade du projet, il est prévu que l'alimentation du réseau EDF se fasse au travers d'une double arrivée haute tension en 90kV et que la centrale autonome de secours soit composée de générateurs à moteur diesel (ou autre technologie) qui produiront du 20kV.

De plus, l'alimentation électrique des systèmes assurant des fonctions de sûreté sera conçue en minimisant les modes communs :

- chaque voie électrique (voie A et voie B) dans l'installation ou le bâtiment possèdera ses propres locaux et cheminements de câbles,
- chaque local électrique (ou groupe de locaux dédiés à une même voie électrique) sera dans un secteur de feu avec toutes les traversées entrantes ou sortantes coupe-feu deux heures,
- les câbles utilisés seront des câbles de catégorie C1 ou C1 + CR1 en conformité avec la norme **NFC 32 070 (conducteurs et câbles isolés pour installations, essais de classification des conducteurs et câbles du point de vue de leur comportement au feu).**

Une supervision en poste/salle de conduite « procédé » permettra de suivre le bon fonctionnement des installations électriques. Ce fonctionnement et les délestages/relestages éventuels pourront également être vérifiés par le système de supervision redondant VDIS (Voie, Donnée, Image, Sécurisée) qui sera situé au PSC (Poste de Sécurité Central).

En cas de perte de l'alimentation électrique normale, l'exploitation sera arrêtée et l'installation sera mise en état sûr. Les moyens de manutention seront arrêtés en position sûre et les charges affalées. Les fonctions de sécurité sont reprises par l'alimentation électrique de secours. Le temps de mise en service de l'alimentation électrique de secours sera compensé par l'autonomie des alimentations permanentes qui permet d'assurer la continuité des systèmes de surveillance et de sécurité de l'exploitation.

Systèmes de ventilation

La perte de la ventilation peut avoir plusieurs origines : la défaillance d'un constituant du réseau de ventilation (ventilateur, par exemple), la perte de l'alimentation électrique, la perte du contrôle-commande, le déclenchement d'un organe de sécurité (alarme incendie, une fermeture de clapets coupe-feu, etc.) ou une agression externe (comme la chute d'avion par exemple).

Elle pourrait conduire à :

- une perte du confinement dynamique (la cascade de dépression permettant d'éviter une dispersion de substances radioactives dans les locaux à risque de contamination moindre ou dans l'environnement n'est plus assurée) et de la filtration des rejets,

- un échauffement des colis, une dégradation potentielle de ceux-ci en cas d'atteinte d'une température trop importante (de l'ordre de 500°C à cœur du verre pour les colis HA),
- un échauffement de l'air ambiant dû à l'échauffement des colis : dégradation de la fonction de protection radiologique assurée par les voiles béton (à partir de 80°C) et dysfonctionnement des matériels électroniques (à partir de 50°C),
- un risque d'explosion dans les locaux abritant des colis émetteurs d'hydrogène consécutivement à l'atteinte d'un taux d'H_2 supérieur à 4 %. Une explosion pourrait entraîner la perte d'une fonction de confinement.

Les mesures de prévention reposeront principalement sur la maintenance des organes mécaniques des unités de ventilation (contrôle périodique des ventilateurs, nettoyage périodique des grilles de ventilation, etc.), l'asservissement entre les ventilateurs d'extraction et les ventilateurs de soufflage afin d'éviter une inversion de la cascade de dépression et la redondance des équipements (ventilateurs, filtres, etc.) et de leurs systèmes supports (alimentation électrique…).

La surveillance du bon fonctionnement de la ventilation sera assurée par les systèmes de détection suivants :

- des mesures de pression différentielles dans les locaux à chaque fois qu'il y a changement de classe de confinement ou de famille de ventilation,
- des mesures de pression différentielles sur les filtres du dernier niveau de filtration afin de surveiller leur colmatage,
- des capteurs de température installés sur l'extraction, si nécessaire.

Ces moyens de surveillance déclencheront l'émission d'une alarme en local en cas de dépassement de seuils fixés, retranscrite en salle de conduite.

En cas de perte de la ventilation, les opérations seront arrêtées, l'installation sera mise en sécurité et le personnel sera évacué.

Moyens de contrôle et de surveillance

La perte des moyens de contrôle et de surveillance peut provenir d'une perte de l'alimentation électrique, d'un défaut d'un équipement ou d'une agression interne ou externe (incendie, séisme…).

Le risque lié à une perte de la surveillance radiologique est la non-détection d'une contamination atmosphérique ou d'une augmentation de l'irradiation. Les balises de contamination et d'irradiation ainsi que l'architecture du Tableau de Contrôle des Rayonnements (TCR) seront conformes aux normes en vigueur et contrôlées par des organismes agréés avant la mise en service. Ces balises seront alimentées en énergie maintenue et les liaisons entre les balises et le système de supervision seront redondantes. Un contrôle de bon fonctionnement de chaque balise (irradiation et contamination) sera réalisé automatiquement, par sécurité positive : un défaut sera signalé au TCR et lors des contrôles et essais périodiques. En cas de défaillance d'une balise (ou de la liaison avec le coffret de signalisation), le local concerné sera mis à l'état sûr (et évacué, si du personnel y est présent). Le local sera de nouveau accessible à la remise en service de la balise, soit après une réparation et une vérification d'étalonnage, soit après un remplacement par un moniteur mobile de secours. De même, en cas d'arrêt intempestif du tableau de contrôle des rayonnements, l'équipe radioprotection annoncera l'arrêt de la surveillance des installations, les opérations seront alors arrêtées, l'installation sera mise à l'état sûr et le personnel sera évacué.

La perte ou la défaillance de systèmes d'alarme et/ou de contrôle-commande peut également avoir pour conséquences l'absence de détection d'incidents (incendie, inondation…), la réalisation de commandes non souhaitées ou l'absence de déclenchement d'automatismes de sécurité (mouvement de colis non souhaité, blocage de la porte d'un sas en position ouverte, etc.). La fiabilité du contrôle-commande sera assurée par une conception adaptée. Les systèmes seront alimentés en énergie maintenue et redondante. Des contrôles et essais seront réalisés périodiquement. Une perte de contrôle commande entraînera la mise en état sûr de l'installation (ex : fermeture des sas de la ligne de conditionnement, possibilité d'affaler les charges des appareils de manutention, arrêt des activités…) et l'évacuation du personnel, si nécessaire.

2.3.2.8 Risque lié au facteur humain et organisationnel

Les risques liés au facteur humain et organisationnel sont la réalisation d'erreurs susceptibles de présenter des risques pour la sûreté de l'installation, des travailleurs et de l'environnement.

Les objectifs de la démarche de réduction des risques au travail sont notamment une meilleure adaptation des objets/équipements (ergonomie) à leurs utilisateurs et une évaluation en termes d'adaptation à l'homme des dispositifs (procédures et organisation) proposés. Cette démarche est basée sur les quatre principes suivants :

- la conception est « centrée sur l'activité de travail » : il s'agit de repérer et comprendre les besoins liés à l'activité de travail ainsi que les contraintes qui portent réellement sur elle. La démarche s'appuie notamment sur une analyse de situations dites de référence et sur le retour d'expérience d'exploitation d'installations similaires à celle qui fait l'objet du projet. Elle permet de cerner les éléments des situations de travail qui conditionnent le déroulement des activités de travail. Les résultats obtenus seront progressivement complétés grâce à des mises en situation d'opérateurs dans des situations représentatives des futures conditions de travail avant la mise en service de l'installation. La prise en compte du retour d'expérience des pratiques dans d'autres installations équivalente permettra de minimiser les risques,
- la conception est « pluridisciplinaire » : chaque acteur intervient dans les choix de conception proposés afin de prendre en compte les différentes catégories d'opérateurs intervenant sur l'installation, bien comprendre les exigences liées aux utilisateurs et aux tâches à réaliser dans le cadre du travail effectif qu'ils ont à accomplir,
- la conception est « itérative et incrémentale » : il s'agit d'itérer entre les exigences et les solutions de conception jusqu'à l'obtention d'une solution répondant aux exigences. Ce processus itératif et incrémental consiste à tester et valider, avec les utilisateurs représentatifs, et si possible futurs de l'installation, la pertinence de la conception proposée vis-à-vis des exigences du facteur humain et organisationnel (aspects validations liés aux missions, aux modes de fonctionnement des opérateurs, aux contextes dans lesquels les opérateurs travaillent…) ainsi que l'acceptabilité de ces solutions par rapport aux exigences générales issues des normes ergonomiques,
- la conception est « assistée par les normes », qu'elles soient méthodologiques ou relatives aux caractéristiques des situations de travail futures.

Une organisation sera mise en place avec une gestion :

- de la documentation de façon à s'assurer que le personnel disposera des informations nécessaires et adéquates pour la réalisation des opérations dans des conditions sûres,
- de la communication de façon à mobiliser les individus, les faire adhérer aux objectifs et aux valeurs de l'entreprise et de s'assurer de la réalisation des opérations dans des conditions sûres,
- de la qualité conformément à l'arrêté du 10 août 1984,
- des ressources humaines et des prestataires de façon à s'assurer des compétences, habilitations et qualifications adéquates du personnel à son poste de travail et de sa sensibilisation aux risques liés aux installations.

L'organisation de la conduite sera définie avec la participation des opérateurs pour l'examen préalable des pratiques réelles de travail, la co-construction des procédures et des modes opératoires, la définition des formations à partir d'une analyse des activités sur le terrain, la définition de critères pour l'organisation du travail collectif, la conception des matériels, la documentation et la gestion du retour d'expérience des événements dans les pratiques de travail.

Les dispositions techniques mises en œuvre seront notamment l'automatisation et/ou la téléopération autant que possible des opérations à risques qui seront définies en fonction la fréquence et de la durée des opérations, de la pénibilité d'exécution des ces opération par les opérateurs, de la sécurité exigée pour les réaliser et des interactions entre les différentes opérations à exécuter. Ces dispositions comprendront également l'aménagement des postes de travail et la prise en compte de l'environnement de travail, de façon à limiter les actions inappropriées et limiter leurs conséquences, et la mise en place de barrières technologiques apportant une assistance aux opérateurs et/ou limitant les erreurs humaines (ex : chaîne de sécurité, détecteur asservi à la mise en sécurité de l'installation,…).

2.3.2.9 Risques liés à la co-activité

La construction des installations par tranches (extensions des ateliers de conditionnement, ateliers d'entreposage en surface, travaux liés à la construction des installations souterraine …) peuvent être sources de dangers pour les installations déjà en exploitation.

Les principales sources de danger identifiées sont la circulation d'engins, les travaux entraînant des vibrations du sol, l'utilisation de grues et l'utilisation de carburant.

Les différentes activités associées à la construction des futures installations peuvent conduire à :

- l'endommagement de bâtiments avec perte du confinement statique (basculement de la grue sur le bâtiment, chute d'une charge sur le bâtiment, explosion d'un réservoir d'essence…),
- l'accident de la circulation sur le site mettant en cause un transport de matières dangereuses (explosion, dissémination de substances radioactives dans l'environnement…),
- l'affaiblissement des structures causé par les vibrations du sol,
- des rejets dans l'environnement.

Concernant la présence de grue, la réglementation en matière de construction et d'utilisation de grue sera appliquée et dans la mesure du possible, les grues seront positionnées hors de portée des bâtiments « sensibles ». Une surveillance de la force du vent et de sa direction sera mise en place pour anticiper les risques de basculement résultant d'une exposition à des vents forts (sur la période 1981-2008, la vitesse maximale du vent observée à la station de Saint-Dizier a été de 44 m/s en rafale, soit près de 160 km/h, le 26/12/1999). Par ailleurs, la disposition des locaux ou ateliers contenant des substances radioactives au centre du bâtiment permettra d'éviter qu'une chute de la grue impacte ces locaux et conduise à une mise en suspension de substances radioactives.

Les dispositions mises en place vis-à-vis du risque de chute ou de collision de charge, seront notamment, l'interdiction de survol des bâtiments et des zones où du personnel peut circuler, la mise en place des périmètres d'exclusion dans lesquels aucune charge ne devra être manutentionnée et l'utilisation d'engins et d'accessoires de manutention équipés de dispositifs de sécurité adéquats. De plus, le génie civil des bâtiments permettra de limiter les conséquences d'une chute de charge ou de la collision d'une charge.

Concernant les risques liés à la circulation d'engins, la vitesse de circulation des véhicules sur le site et la circulation des transports lorsque les conditions météorologiques sont difficiles seront limités, un plan de circulation (séparation et régulation des flux de véhicules) tenant compte des travaux sera mis en place.

Concernant les risques liés aux vibrations du sol lors de la construction de bâtiments, les conséquences sur les installations ne sont pas estimées à ce stade des études. Dans le cas où les vibrations seraient susceptibles de remettre en cause la stabilité des installations construites, les dispositions envisagées pourraient être notamment le terrassement, avant toute construction de bâtiment, de tous les périmètres de terrain à construire ou de ceux les plus proches des installations en exploitation et le respect d'une distance suffisante entre les différents bâtiments à construire.

La présence d'une cuve ou d'une station de carburant sur le site n'étant pas exclue, les principales dispositions prises en compte à la conception seront l'éloignement de la station de carburant des ateliers et le dimensionnement du bâtiment à l'onde de surpression qui pourrait être occasionnée par une explosion de la cuve. La présence de source d'ignition sera interdite à proximité et la quantité de stockage de carburant y sera limitée au strict nécessaire. Des contrôles périodiques seront réalisés au niveau de la station de carburant. De plus, un système de détection d'incendie (détection automatique, rondes, vidéosurveillance…) et un système d'alarme y seront mis en place.

2.3.3 Risques d'origine externe

2.3.3.1 Séisme

Sur les installations de surface, un séisme peut conduire à une dégradation du génie civil (bâtiment, ateliers, locaux, etc.), à l'endommagement d'équipements assurant des fonctions importantes pour la

sûreté (protections radiologiques, équipements assurant le confinement des substances radioactives, ventilation, alimentations électriques, contrôle-commande, surveillance), voire à la modification de la configuration géométrique (agencement) des colis ou des réseaux de colis et la remise en question d'une configuration sous-critique assurée par la géométrie.

Les risques potentiels associés à l'occurrence d'un séisme peuvent donc être une dissémination de substances radioactives, une exposition externe du personnel, un accident de criticité, une inondation interne, par perte d'intégrité des canalisations ou cuves et/ou un incendie.

Concernant le risque sismique, la pratique réglementaire française prévoit que le maintien des fonctions importantes de sûreté d'une installation nucléaire puisse être assuré pendant et/ou à la suite d'un séisme plausible pouvant affecter l'installation considérée. Pour satisfaire cet objectif, la règle fondamentale de sûreté relative à la détermination du risque sismique (RFS n° 2001-01) se base sur une démarche déterministe dans laquelle les mouvements de référence sont associés à des séismes de référence.

Dans le secteur Meuse/Haute-Marne (Andra, 2009e), aucun séisme n'a été relaté ou identifié par des témoignages historiques ou des enregistrements plus récents. Les séismes historiques connus les plus proches sont situés à plus de 60 km du site (essentiellement dans les Vosges) et présentent une magnitude comprise entre 3 et 6. Les données de sismicité disponibles confirment que la région est remarquablement peu sismogène. Pour des sources locales, la magnitude des séismes historiquement connu est comprise entre 3,8 et 5,3, pour des sources régionales entre 4,9 et 5,7 pour une distance à l'épicentre de 25 à 160 km. Ces séismes restent faibles, si bien que la RFS 2001-01 impose de prendre en compte le spectre minimal forfaitaire dont les accélérations sont présentées dans le Tableau 2.3-4 (spectre calé à 0,1 g à l'infini ; calculé en fonction des caractéristiques du site de Bure).

Tableau 2.3-4 Spectre minimal forfaitaire imposé par la RFS 2001-01 à appliquer dans le secteur de Meuse/Haute-Marne

Période (s)	0	0,1	0,2	0,4	1	2
Accélération (g)	0,01	0,23	0,22	0,15	0,06	0,03

Ce spectre forfaitaire s'applique partout sur la zone potentielle d'implantation en surface, excepté sur la bordure sud-est de la zone de transposition et localement sur la bordure sud-ouest de la zone de transposition élargie pour les installations de surface. Là, pour les périodes du spectre inférieures à 0,4 s, les mouvements calculés avec le modèle sismotectonique par failles (modèle MS3), présentés dans le Tableau 2.3-5, sont plus forts que ceux du spectre minimal forfaitaire.

Tableau 2.3-5 Variabilité spatiale des accélérations sur la zone de transposition obtenue avec l'application du modèle sismotectonique par failles MS3

Période (s)	0	0,1	0,2	0,4	1	2
Gamme	0,01	0,15	0,14	0,07	0,02	0,01
des accélérations (g)	0,15	0,37	0,35	0,15	0,03	0,02

La Figure 2.3-1 localise ces zones.

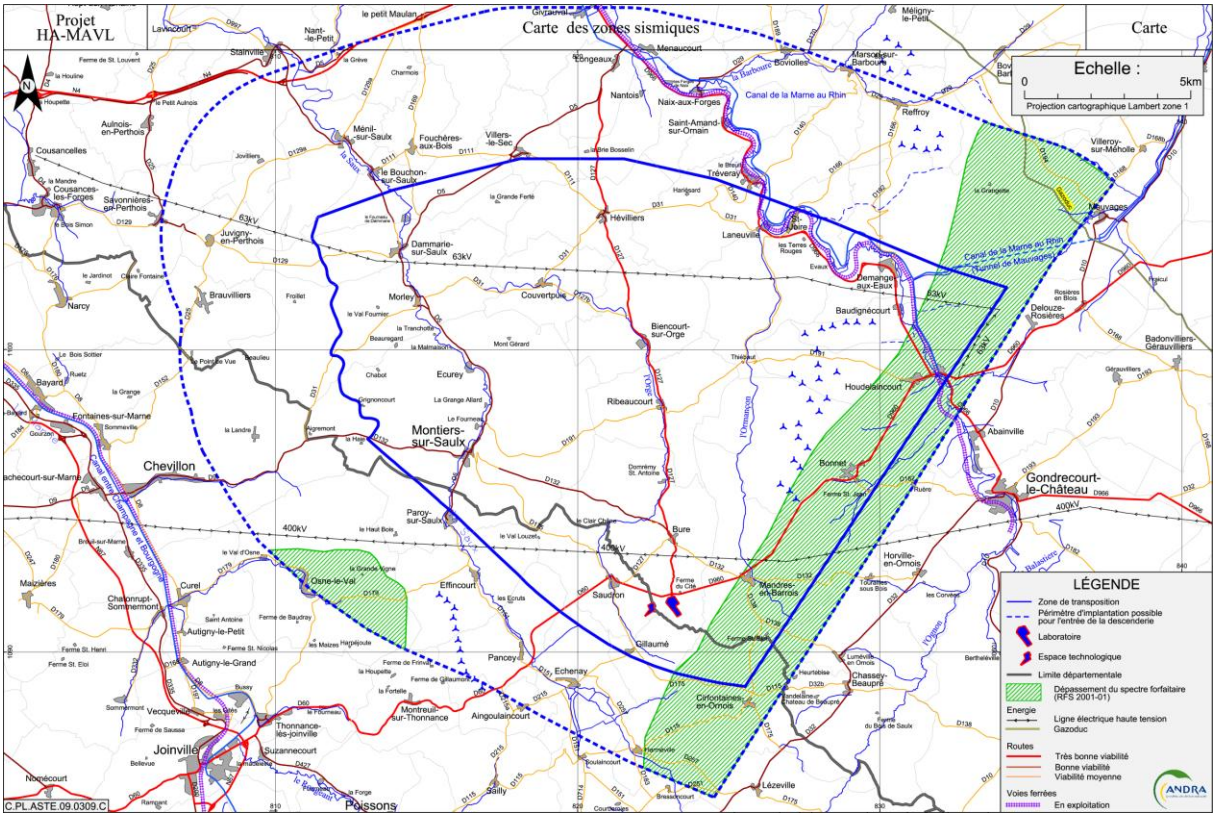


Figure 2.3-1 Carte des zones sismiques (dépassement du spectre forfaitaire imposé par la RFS 2001-01)

Sur le site, le génie civil des locaux abritant des colis sera dimensionné au SMS pour que ces locaux et les protections radiologiques, essentiellement assurées par les voiles bétons, ne s'effondrent pas et restent intègres. De plus, les équipements assurant des fonctions importantes pour la sûreté ou pouvant présenter une agression vis-à-vis du maintien de ces fonctions (équipements de manutention et les supportages des canalisations, etc.) seront dimensionnés afin de résister au SMS.

Enfin, compte tenu de la possibilité de gerbage des colis dans certains ateliers/locaux des installations de surface, la stabilité des piles de colis lors d'un séisme (SMS) sera démontrée dans le rapport de sûreté accompagnant la demande d'autorisation de création, lorsque la localisation du site sera connue (post-Jalon 2009).

2.3.3.2 Chute d'avion

La chute d'un avion sur les installations nucléaires de surface pourrait entraîner une perte de confinement et, par conséquent, un risque d'exposition radiologique du personnel d'exploitation et de la population et/ou une perte d'une ou de plusieurs fonctions importantes pour la sûreté.

La règle fondamentale de sûreté relative à la prise en compte de risque lié aux chutes d'avions (RFS I.1.a) demande de prendre en compte, dans la conception des INB et pendant les différentes phases de vie, les risques induits par le trafic aérien. La RFS I.1.a recommande d'effectuer une évaluation de la probabilité de chute sur chacune des « cibles » définies pour les trois familles d'avions (aviation générale, aviation commerciale et aviation militaire). On considère comme « cible » à protéger l'ensemble des structures et équipements nécessaires aux fonctions de sûreté de l'atelier. Est désigné par atelier une partie de l'installation présentant une unité du point de vue de la fonction industrielle ou de recherche et/ou une indépendance des fonctions de sûreté susceptibles d'être concernées par l'agression, par rapport aux infrastructures environnantes.

L'objectif retenu est que la probabilité globale (combinatoire des trois familles) qu'un local/bâtiment/atelier puisse être à l'origine de rejets inacceptables ne dépasse pas 10^{-6} par an. Il convient de considérer qu'une famille de sources d'agressions provenant d'une des trois familles

d'avions (générale, militaire et commerciale) doit être prise en compte dans le dimensionnement si la probabilité qu'elle puisse conduire à des rejets inacceptables est supérieure à 10^{-7} par an.

Les probabilités de chutes d'avions ont été évaluées sur la zone potentielle d'implantation en surface pour les trois familles d'avions (Andra, 2009l). L'étude de l'environnement aérien et un calcul préliminaire des probabilités de chute d'avion ont permis de distinguer 6 zones présentées sur la Figure 2.3-2.

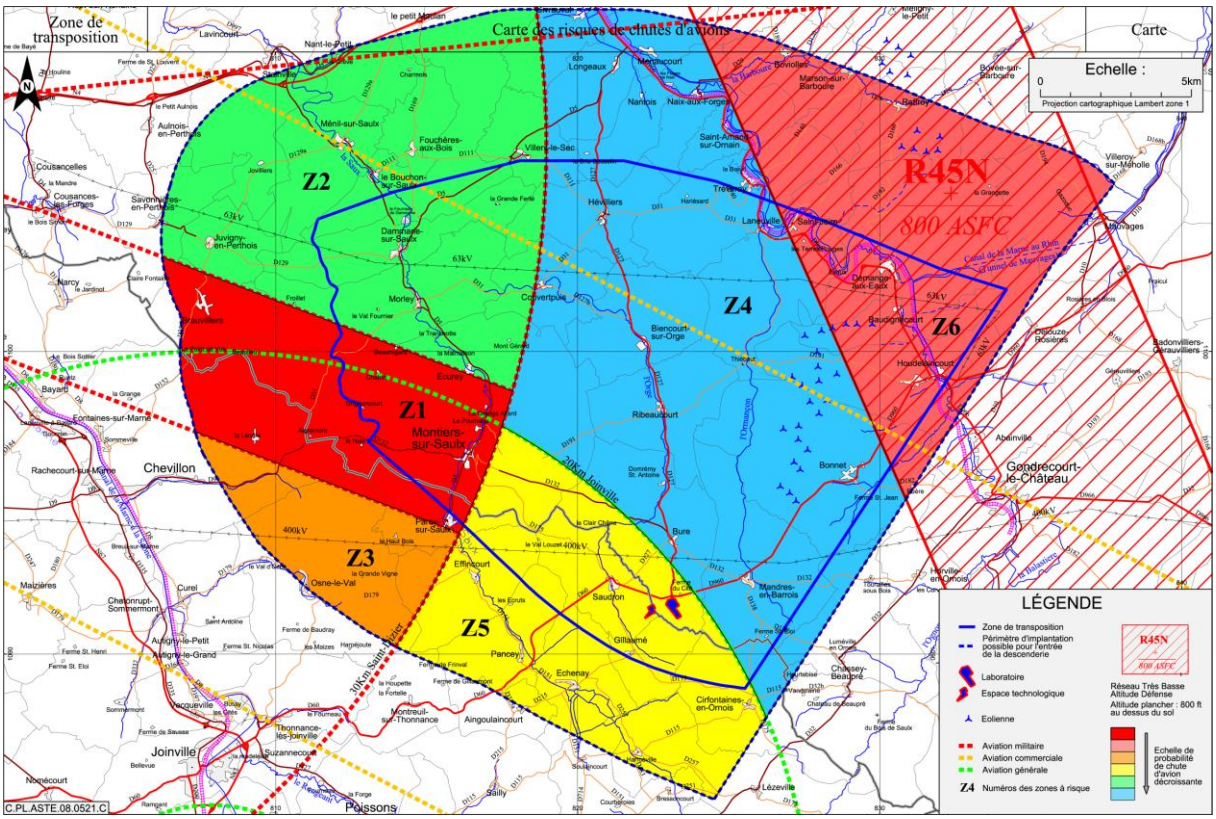


Figure 2.3-2 Carte des risques de chute d'avion

Aucune de ces zones n'est exclue à priori pour l'implantation des installations de surface du centre de stockage sous réserve de respecter l'ordre de grandeur des surfaces virtuelles maximales[28] calculé pour lequel un dimensionnement des bâtiments à la chute d'avion n'est pas nécessaire. Néanmoins, les zones à privilégier seront celles dont le dimensionnement vis-à-vis de l'aviation militaire est le moins contraignant.

Ainsi, les zones 1 et 6 nécessiteront un dimensionnement des bâtiments abritant des fonctions de sûreté très contraignant compte tenu de la dimension réduite de la surface virtuelle calculée et d'une agression par un avion militaire. Les zones 2, 4 et 5 seront à privilégier pour l'emplacement du (des) future(s) ZIIS.

Une évaluation affinée du risque de chute d'avions sera réalisée dans le cadre des études plus détaillées de scénarios d'implantation. Elle permettra de définir plus précisément les dispositions à mettre en place et en particulier le dimensionnement des locaux à risques.

2.3.3.3 Perte de la fourniture en énergie et utilités

Les installations de surface de l'Andra seront alimentées en électricité par le réseau EDF et en eau par le réseau d'eau potable et incendie des collectivités. Les risques sont donc de perdre l'alimentation électrique (notamment de la ventilation, des moyens de manutention et/ou des moyens de

[28] La surface virtuelle d'une cible est la projection cylindrique de sa surface selon les angles de chute des avions, ces derniers variant avec le type d'avions considérés.

détection/surveillance et de contrôle-commande) ou l'alimentation en eau (des systèmes de refroidissement et des systèmes d'extinction incendie en particulier) de l'ensemble du site.

En cas de perte de l'alimentation électrique EDF, les systèmes de sécurité seront réalimentés par une centrale de secours composée de générateurs à moteur diesel (ou autre technologie) et indépendante du réseau EDF, la continuité de fonctionnement des systèmes de surveillance et de sécurité de l'exploitation sera assurée par des alimentations permanentes pendant le basculement sur la centrale de secours, les systèmes de « sauvegarde » seront alimentés par des groupes diesel Basse Tension, indépendants de l'alimentation normale et de secours ; cette alimentation sera dimensionnée aux agressions externes (séisme, onde de surpression) et des réserves de fioul seront disponibles sur le site pour réapprovisionner les générateurs de secours et de sauvegarde, en quantité suffisante pour permettre le fonctionnement des récepteurs/actionneurs de sécurité et de sauvegarde en attendant le réapprovisionnement du site en fioul ou le rétablissement de l'alimentation électrique par le réseau EDF.

En cas de perte de l'alimentation en eau, le site disposera d'une réserve d'eau incendie et d'une capacité de rétention des eaux d'extinction, destinée à faciliter l'intervention des secours et à limiter la dissémination de polluants et de contamination dans l'environnement en cas d'incendie. Les activités qui utilisent un système de refroidissement à eau seront arrêtées (ex : soudure des colis de stockage HA…) et mises en sécurité en cas de perte du réseau d'eau.

2.3.3.4 Conditions climatiques extrêmes

Les risques liés aux avaries climatiques courantes et exceptionnelles sont la chute importante de neige, les vents violents, la foudre, les intempéries et les températures extrêmes.

Les stations météorologiques disponibles pour établir les caractéristiques régionales et locales du climat sont essentiellement celles relevées par météo-France. Pour établir une analyse de la climatologie locale (Andra, 2009e), seuls les postes encore ouverts ces dix dernières années situés dans un rayon de moins de 40 km (cf. Figure 2.3-3) et les grandes stations de Saint-Dizier, Langres et Nancy (données climatiques plus étendues) ont été retenus. Et, depuis 2002, la station météo installée sur le site du laboratoire Meuse/Haute-Marne (Est-6 000) permet de disposer de relevés sur certains paramètres (précipitations, températures, vitesse et direction du vent, humidité relative et pression atmosphérique).

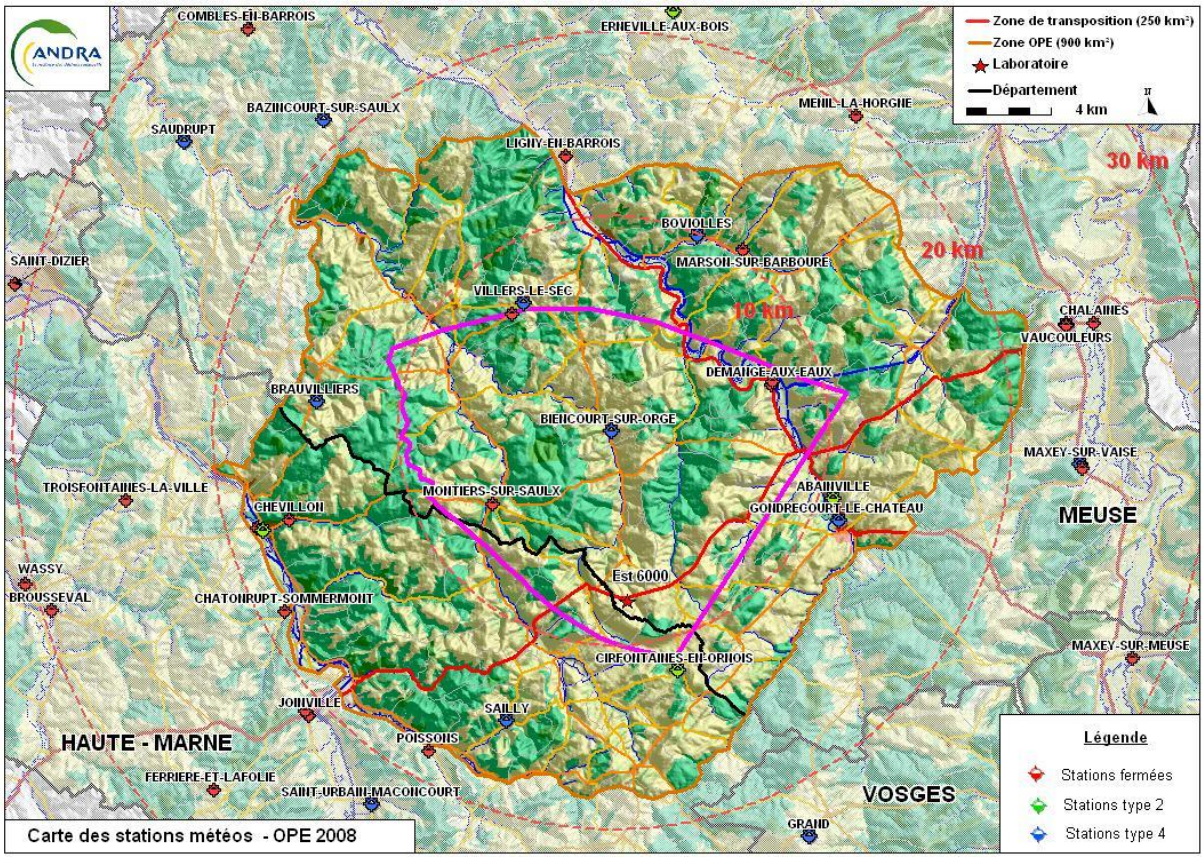


Figure 2.3-3 *Carte des stations météorologiques existantes à proximité du secteur d'étude*

Neige et vents

Dans la région, l'hiver est humide avec de nombreuses gelées et des précipitations neigeuses régulières. Pour les stations du plateau du Barrois, elles représentent entre 8 et 10 % de la pluviométrie annuelle sur un nombre moyen de jours de l'ordre de 15 à 20 jours par an.

En ce qui concerne les régimes de vents, les données font apparaître un certain nombre de différences :

- le pourcentage des vents calmes (0 m/s) n'est pas mesuré à Bure. Le niveau de ces vents à Saint-Dizier est faible (4,7 %) et beaucoup plus conséquent à Abainville (11,8 %) et Erneville (14,9 %),
- pour les vents faibles (inférieurs à 1 m/s), cette tendance est confirmée pour les 3 stations Météo-France, la station de Bure vient s'intercaler. L'ordre de ces pourcentages observés est le suivant : Saint-Dizier < Abainville < Bure Est 6000 < Erneville,
- la vitesse des vents moyens observée est : Abainville (2,6 m/s) < Erneville (2,8 m/s) < Saint-Dizier (3,2 m/s) < Bure Est 6000 (3,7 m/s).

Sur la période 1981-2008, la vitesse maximale du vent observée à la station de Saint-Dizier (station météorologique la plus ancienne à proximité de la zone d'étude) a été de 44 m/s en rafale (soit près de 160 km/h) le 26/12/1999.

Les risques potentiels liés à la neige et au vent sont l'effondrement des structures sous le poids de la neige, l'endommagement des structures sous l'effet de fortes rafales de vent ou la perte de la cascade de dépression (ventilation nucléaire) sous l'effet du vent. Un effondrement ou endommagement des structures peut conduire à une perte de confinement et à un risque de dissémination de substances radioactives. La perte de la cascade de dépression peut également conduire à un risque de dissémination de substances radioactives.

Les installations seront dimensionnées pour résister à la neige et au vent selon la réglementation en vigueur (DTU P 06-002 : Règles NV 65). De plus, les effets du vent[29] seront pris en compte dans le dimensionnement de la ventilation nucléaire (maintien de la cascade de dépression) et en interposant autant que possible plusieurs barrières successives, globalement concentriques entre les sources et l'environnement. Ainsi, les locaux à risques seront préférentiellement situés au centre du bâtiment de la zone réglementée. En cas de vents forts (pour lesquels un risque de perte de la cascade de dépression assurée par la ventilation nucléaire serait identifié), les opérations à risque (manutention notamment) pourraient être arrêtées et le personnel évacué.

Températures extrêmes

La région Meuse / Haute-Marne est caractérisée par un climat dit de type « océanique tempéré à tendance continentale ». Il est caractérisé par un affaiblissement de l'influence des masses d'air atlantiques et par l'alternance saisonnière de courants froids en provenance d'Europe du Nord l'hiver et de courants d'origine méridionale l'été. Ces phénomènes se traduisent par une amplitude thermique saisonnière de 20°C et des hivers froids avec une température minimale mensuelle négative pendant 2 mois. Les températures moyennes annuelles oscillent autour de 10°C.

Les risques liés à des températures extrêmes peuvent être la perte de la ventilation par givrage des entrées d'air sous basse température ou la perte de fonctions importantes pour la sûreté (confinement, protections radiologiques …) en cas d'augmentation ou de diminution de la température au-delà de leur limite de conception.

Conformément à ce qui est classiquement fait pour les installations nucléaires de base françaises, les installations (bâtiment, ventilation…) seront conçues pour fonctionner en régime permanent (fonctionnement normal) pour des températures extérieures comprises entre -15 °C et +35 °C. Compte tenu de la variabilité des données climatiques dans la région Meuse/Haute-Marne, les températures extrêmes à prendre en compte pour le dimensionnement ne pourront être évaluées qu'à partir des données de la station météorologique la plus représentative au regard du site d'implantation des installations de surface retenu (post-Jalon 2009).

Un système de surveillance de la température (alarmes, asservissement à des systèmes de chauffage ou de refroidissement) sur les systèmes de ventilation et/ou dans les locaux à risques sera mis en place si nécessaire. En cas de détection d'une température en dehors de la plage de fonctionnement, les opérations seront arrêtées, les locaux seront mis en situation sûre (des moyens matériels et organisationnels pourront être mis en place si besoin) et le personnel sera évacué.

Intempéries

Des intempéries (neige, pluie, verglas, brouillard, tempête) peuvent conduire à des accidents de circulation, à une inondation des installations (cf. § 2.3.3.5) et/ou à une perte d'alimentations électriques.

Les conséquences potentielles d'une inondation d'origine externe ou d'une perte d'alimentations électriques et les dispositions associées sont présentées aux paragraphes correspondants (cf. § 2.3.3.5 et 2.3.3.3).

Les conséquences potentielles d'accidents de circulation sont principalement des blessures du personnel. Les dispositions mises en œuvre afin d'éviter des accidents de circulation dus à des intempéries sont l'établissement de règles de circulation, une signalisation adéquate, un balisage clair des voies de circulation sur le site, une limitation de la vitesse et des dispositifs de déneigement et de salage en cas de chutes de neige. Des alertes météorologiques seront également mises en place pour limiter la circulation en cas de faible visibilité ou de chaussées glissantes. Le retour d'expérience du laboratoire souterrain sera mis à profit.

[29] Compte tenu de la variabilité des données sur la zone de transposition élargie (Andra, 2009e), les conditions de fonctionnement ne pourront être déterminées de manière précise qu'une fois le site d'implantation des installations de surface du centre de stockage retenu, soit après le Jalon 2009.

Foudre

La densité de foudroiement (impacts/km²/an) dans la région Meuse / Haute-Marne, et notamment sur l'ensemble de la zone d'implantation possible en surface, est de l'ordre de la moyenne nationale, qui est de 1,84 impacts/km²/an (cf. Figure 2.3-4).

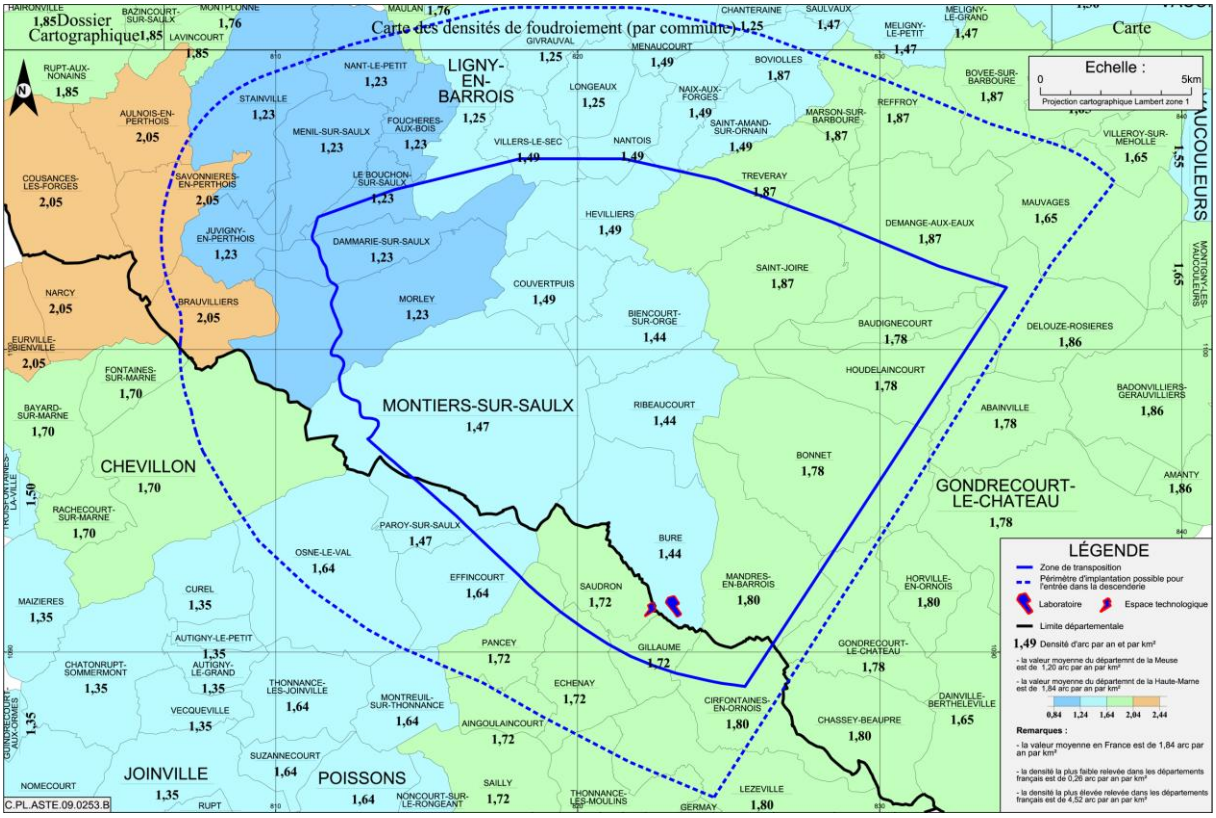


Figure 2.3-4 Carte des densités de foudroiement (impacts/km²/an) par commune

La foudre est un facteur générateur de surtension. Les conséquences potentielles de la foudre sont la perte de la fourniture en énergie de l'installation, un départ de feu et des blessures du personnel.

Toutes les installations seront donc protégées contre les effets directs et indirects de la foudre sur la base des données Météorage présentées sur la Figure 2.3-4 et conformément aux exigences de l'Arrêté du 31 janvier 2006 et selon la nouvelle norme en vigueur (NF EN 62305) qui constituent l'état de l'art actuel en matière de protection contre la foudre.

2.3.3.5 Inondation externe

La pluviométrie moyenne interannuelle se situe, sur le plateau du Barrois et sur le Haut Pays, entre 1000 et 1100 mm. La saisonnalité des précipitations est telle que des maximums sont enregistrés en décembre-janvier et des minima en avril et juillet-août. Durant l'hiver, pour les stations du plateau du Barrois, les précipitations neigeuses représentent entre 8 et 10% de la pluviométrie annuelle sur un nombre moyen de jours de l'ordre de 15 à 20 jours par an.

Le plateau du Barrois est drainé essentiellement par la Saulx et ses tributaires, dont les vallées sont étroites et encaissées. Ces cours d'eau sont alimentés par une pluviométrie importante (supérieure à 1000 mm/an), d'où une lame ruisselée moyenne annuelle d'environ 500 mm. Le reste du secteur de la zone d'étude comprend au Nord et à l'Est le bassin supérieur de l'Ornain, qui collecte deux affluents drainant le revers de la côte de Meuse et à l'Ouest se trouve la vallée de la Marne, aux reliefs très accentués, qui collecte de nombreux affluents de part et d'autre. Ils sont alimentés par une pluviométrie moins importante (environ 850 mm/an), d'où une lame ruisselée moyenne annuelle d'environ 400 mm.

Au regard des ces données, le risque d'inondation externe sur les installations en surface peut avoir pour origine de fortes précipitations ruisselant sur les bassins versant, faisant sortir les cours d'eau de leurs lits et remonter les nappes phréatiques créant ainsi une montée des eaux sur le site. Le risque d'inondation pour les installations peut également provenir de la présence de réservoirs artificiels à proximité du site.

Une inondation d'origine externe peut conduire à une entrée d'eau dans des locaux contenant des substances radioactives et/ou à une perte de disponibilité de fonctions supports (alimentations électriques externe, télécommunications, moyens de secours externes, dispositifs de rejets…).

L'étude des caractéristiques hydrogéologiques de la zone potentielle d'implantation en surface permet de distinguer 2 types de zones (cf. Figure 2.3-5) pour lesquelles le dimensionnement des installations serait plus contraignant. Ces zones sont les zones sous influence de bassins versants (risque de ruissellements significatifs) et les zones sous influence de cours d'eau (risque de débordement) en cas de fortes pluies. Ainsi, pour implanter les installations de surface, on cherchera à éviter les zones en fond de vallées.

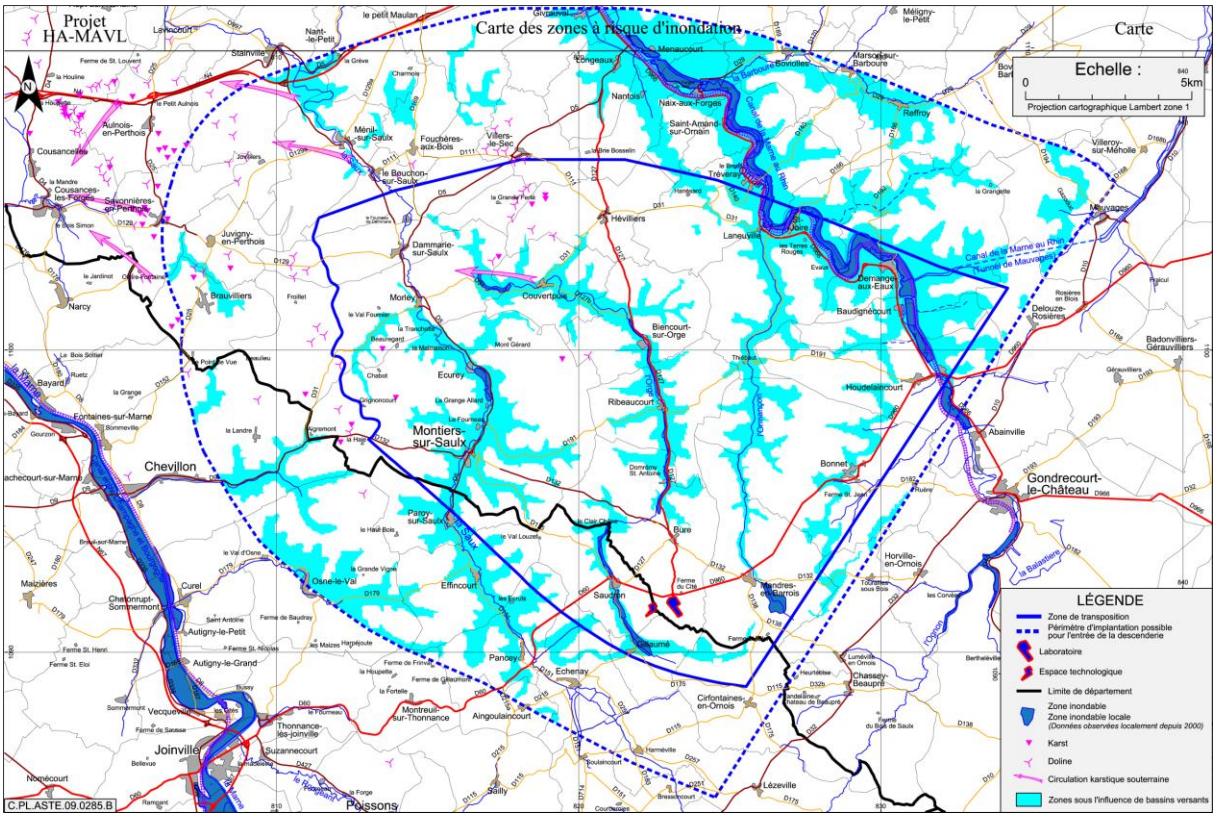


Figure 2.3-5 Carte des zones à risque d'inondation

Vis-à-vis des risques liés aux fortes précipitations, l'aménagement de la plate-forme (pentes, aménagement de la voirie…) et le dimensionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales (dispositifs de canalisations, capacités de rétention…) permettront d'éviter toute arrivée d'eau vers les locaux à protéger (locaux contenant les matériels participant au maintien de l'installation dans un état sûr, locaux contenant des substances radioactives). Autant que possible, les réservoirs, bassins et canalisations externes seront disposés et conçus de façon à limiter les conséquences d'une rupture accidentelle ou d'un débordement. De plus, en fonction du niveau de nappe phréatique de référence qui sera défini à partir des caractéristiques du site retenu (post-Jalon 2009), il pourra être envisagé si nécessaire un drainage ou un rabattement permanent de la nappe.

Des moyens de surveillance des installations et des locaux permettront de détecter une présence anormale d'eau si nécessaire (dépendra des situations de référence inondation[30] qui seront définies au regard des caractéristiques du site d'implantation des installations de surface retenu). De même, si le maintien des fonctions de sûreté nécessite l'utilisation de moyens mobiles (alimentations électriques, moyens de pompage…) et/ou la mise en place d'un système d'alerte, ceux-ci seront adaptés à la cinétique des situations de référence inondation à considérer.

2.3.3.6 Installations environnantes et voies de communication terrestres (incendie externe, explosion extérieure aux installations)

La pratique réglementaire française (RFS I.1.b) prévoit que la sûreté des installations nucléaires de base, notamment le confinement des produits radioactifs, puisse être assuré dans toutes les situations considérées comme plausibles pouvant résulter du fonctionnement normal ou accidentel des installations voisines, y compris les voies de communications.

Pour la zone de transposition élargie au périmètre d'implantation possible pour l'entrée de la descenderie, les installations environnantes et les voies de communications terrestres et de transport d'énergie sont principalement les installations de l'Andra (Laboratoire souterrain, Centre Technologique), les installations Classées Pour l'Environnement (ICPE) soumises à autorisation (élevages, fabrique de charbon de bois, coopérative agricole, entreprise d'équarrissage), le parc éolien, le gazoduc, les lignes électriques de haute tension, les éventuelles stations d'essence, le trafic terrestre (routes, chemin de fer…), le canal navigable et les zones boisées (forêts) (cf. Figure 2.3-6).

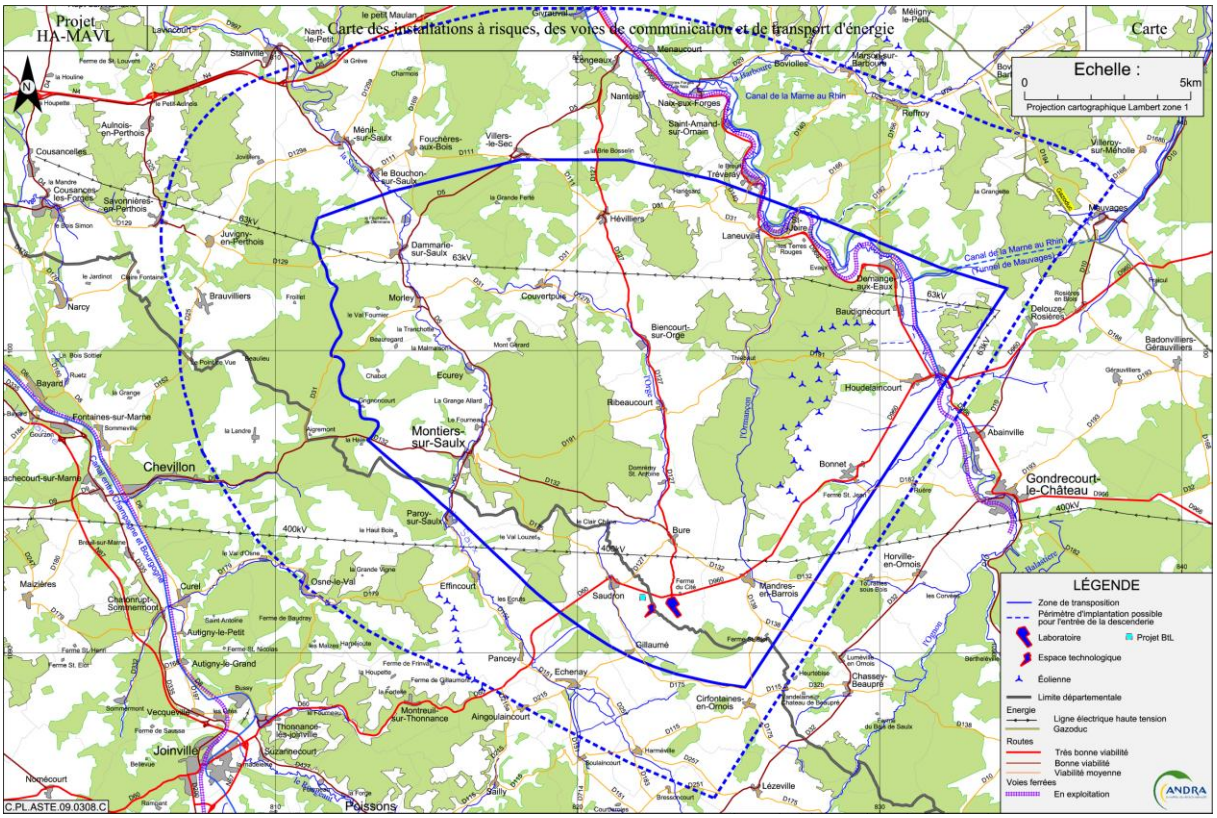


Figure 2.3-6 Carte des installations à risques, des voies de communication et de transport d'énergie

Les risques liés à la présence de ces installations industrielles et des voies de communications à proximité du site sont principalement une élévation anormale de la température ou l'arrivée d'un nuage de gaz/fumées toxiques dus à un incendie et une onde de surpression ou des projectiles engendrés par une explosion.

[30] Une « situation de référence pour le risque d'inondation » (SRI) est définie à partir d'un événement ou d'une conjonction d'événements dont les caractéristiques sont éventuellement majorées (conjonction pénalisante ou majoration, permettant de couvrir les limites de connaissances actuelles).

En fonction du choix de la zone d'implantation des installations de surface (post-Jalon 2009), un périmètre de sécurité sera défini autour des installations afin de se prémunir de l'agression des bâtiments par un feu externe et de faciliter l'intervention des secours. La définition de ce périmètre tiendra compte de l'influence des vents dominants et pourra nécessiter le déboisement autour des installations en cas de présence de forêt à proximité.

De plus, lorsque le site d'implantation des installations de surface du centre de stockage sera retenu (post-Jalon 2009), la probabilité d'occurrence qu'une explosion sur une installation industrielle ou sur les voies de communication à proximité du site conduise à des rejets inacceptable sera évaluée plus précisément et si cette probabilité est supérieure à 10^{-7}/an, alors les installations seront dimensionnées à l'onde de surpression correspondante.

Dans la mesure du possible, les installations de surface seront implantées à distance des installations présentant un risque d'explosion. En première approche, il est envisagé de dimensionner les locaux pour résister à une surpression de 20 mBar et donc il est préconisé d'éviter d'implanter les bâtiments des installations de surface à moins de 1,5 km des axes routiers à fort trafic. En effet, l'explosion d'un camion citerne de propane génère une surpression de 20 mbar sur une installation située à 1,5 km. Le respect de ce périmètre permettrait de s'affranchir d'exigences sur le dimensionnement des bâtiments prenant en compte une onde de surpression supérieure à 20 mbar.

2.3.3.7 Risques d'origine humaine

Les risques d'origine humaine étudiés sont les actes de malveillance. Les menaces prises en compte dans l'étude sont notamment les manifestations de foule hostile à l'abord du site et les actions malveillantes d'individus à proximité ou sur le site. Les conséquences redoutées de tels événements sont principalement la détérioration de matériels et équipements de sûreté/sécurité et le vol de matières fissiles.

Les installations de l'Andra recevront des colis de déchets HA et MAVL contenant des matières fissiles (notamment U235 et Pu239). Toutefois, il est rappelé que la nature et le conditionnement des déchets rend difficile le vol de matières radioactives.

Les dispositions de protection physique des installations seront définies conformément à la réglementation. L'Article R1333-70 du code de la défense établi un classement des matières nucléaires selon leur nature et leur quantité en trois catégories (cf. Tableau 2.3-6).

Tableau 2.3-6 Classement des matières nucléaires en fonction de leur nature et de leur quantité - article R1333-70

Matière	Etat	Catégories		
		I	II	III
Plutonium[31]	Non irradié[32]	2 kg ou plus	Moins de 2 kg mais plus de 400 g	400 g ou moins mais plus de 3 g
Uranium	Non irradié[32] Uranium enrichi à 20% ou plus en U235 Uranium enrichi à 10 % ou plus mais à moins de 20 % en U235 Uranium enrichi à moins de 10% en U235	5 kg au plus - -	Moins de 5 kg mais plus de 1 kg 5 kg ou plus -	1 kg ou moins mais plus de 15 g Moins de 5 kg mais plus de 1 kg 5 kg au plus
Uranium 233	Non irradié[32]	2 kg ou plus	Moins de 2 kg mais plus de 400 g	400 g au moins mais plus de 3 g

[31] Tous isotopes de plutonium

[32] Matières non irradiées dans un réacteur ou matières irradiées dans un réacteur délivrant un débit de dose absorbée dans l'air inférieur ou égal à 1 Gy/heure (100 rads/h) à un mètre de distance sans écran

Matière	Etat	Catégories		
		I	II	III
Tritium	Non irradié[32]	5 g ou plus	Moins de 5 g mais plus de 2 g	-
Uranium naturel, uranium appauvri en isotope 235, Thorium	Non irradié[32]	-	-	500 g au plus
Lithium enrichi en lithium 6	Non irradié[32]	-	-	1kg ou plus de lithium 6 contenu
Combustibles irradiés	Irradié[33]	-	Tous combustibles	-

En fonction de ce classement, les dispositions de protection physique des installations de surface répondront aux deux critères fixés par L'Article R1333-15 du code de la défense :

1° - Niveau minimal de protection

- Matières appartenant à la catégorie III :
  Utilisation et entreposage à l'intérieur d'une zone dont l'accès est contrôlé. Par zone, on entend l'installation ou la partie de l'installation où sont utilisées ou entreposées les matières nucléaires.
- Matières appartenant à la catégorie II :
  Utilisation et entreposage à l'intérieur d'une zone protégée dont l'accès est contrôlé et placé sous la surveillance constante de gardes ou de dispositifs de sécurité ; cette zone est entourée d'une barrière physique avec un nombre limité de points d'entrée surveillés de manière adéquate.
- Matières appartenant à la catégorie I :
  Utilisation et entreposage dans une zone hautement protégée. Il s'agit d'une zone protégée telle qu'elle est définie pour la catégorie II ci-dessus et dont, en outre, l'accès est limité aux personnes dont il a été établi qu'elles présentaient toutes garanties en matière de sécurité. Cette zone est placée sous la surveillance constante de gardes qui se tiennent en liaison étroite avec les forces publiques d'intervention.
  Les mesures spécifiques prises pour la catégorie I doivent avoir pour objectif la détection et la prévention de toute attaque, de toute pénétration non autorisée et de tout enlèvement de matières non autorisé. En cas de transferts internes entre zones d'un même établissement, les mesures de protection en cours de transfert doivent être d'un niveau équivalent à celui des mesures de protection appliquées dans les zones où les matières nucléaires sont entreposées.

2° - Caractère confidentiel

Les mesures de protection physique appliquées au sein de l'établissement ou de l'installation ne doivent être connues que des personnes régulièrement autorisées à cet effet par le ministre chargé de l'industrie ou le titulaire d'une autorisation.

Compte tenu de la réception de combustibles usés CU3 dans les installations de surface, un classement en catégorie II est proposé ; ce classement sera confirmé au moment la Demande d'Autorisation de Création. Compte tenu du fait que les mesures de protection physiques qui y seront associées ne doivent être connues que des personnes régulièrement autorisées à cet effet par le ministre chargé de l'industrie ou le titulaire d'une autorisation, elles ne sont pas présentées dans le présent document.

[33] Matières nucléaires irradiées dans un réacteur délivrant un débit de dose absorbée supérieure à 1 Gy/heure (100 rads/h) dans l'air à 1 mètre de distance sans écran

2.3.4 Risques spécifiques à la durée d'exploitation

La durée de l'exploitation des installations de surface du centre de stockage est estimée à environ une centaine d'années (durée minimale requise au titre de la réversibilité). Cette durée est supérieure à celle des installations nucléaires actuellement en exploitation mais le retour d'expérience sur d'autres installations indique la possibilité de maintenir les installations sur une durée séculaire. La durée envisagée conduit à considérer deux risques supplémentaires :

- le vieillissement des installations, équipements et colis,
- la perte de maîtrise technique, correspondant à un abandon partiel avec absence de maintenance.

2.3.4.1 Vieillissement des installations, équipements et colis

Les installations de surface du centre de stockage sont par définition des installations temporaires. Même si elles doivent rester opérationnelles pendant une durée séculaire, elles ne sont pas conçues pour être définitives. La spécificité de ces installations sera de garantir une maîtrise continue, pendant une centaine d'années, de cette reprise différée.

Pour cela, le dimensionnement des installations répondra à des critères de flexibilité importants, notamment par une accessibilité et des moyens de surveillance renforcés, par la capacité à évoluer face à des situations non prévues à la conception et par la capacité à s'adapter aux moyens industriels du futur (flexibilité d'interface avec différentes techniques envisagées aujourd'hui). Les risques liés à la reprise des colis issus de la réversibilité seront pris en compte par des dispositions telles que la minimisation des hauteurs de manutention pour réduire les conséquences d'une éventuelle chute (la démonstration de la tenue à la chute d'un colis ayant été stockés en souterrain pendant 100 ans étant techniquement difficile) et une redondance potentielle[34] des dispositifs de préhension des colis, pour palier à une éventuelle dégradation du dispositif sera prévue.

De manière générale, la conception s'attachera à rechercher des systèmes les plus robustes possibles : rustiques, passifs, durables ou maintenables.

2.3.4.2 Perte de maîtrise technique

Il est difficile de prédire le contexte politique et social à venir. On peut toutefois au regard du retour d'expérience considérer que la pérennité des structures étatiques garantit, au moins pour des durées inférieures à 120/150 ans (l'équivalent aujourd'hui d'institutions ou d'installations créées dans la seconde moitié du XIXème siècle), la très faible probabilité d'occurrence d'une telle situation.

Par ailleurs, la traçabilité des informations sera garantie par un double archivage, entreposés dans des lieux géographiquement séparés, des caractéristiques des déchets reçus, conditionnés puis stockés, de l'historique d'exploitation des installations (chronologie d'exploitation, historique des modifications et évolution des installations, faits marquants…), des plans des installations et des résultats de la surveillance des installations et de leur environnement (cf. § 1.5.6).

2.4 Situations de dimensionnement

Pour satisfaire aux objectifs de sûreté définis par l'Andra (cf. § 1.5), les conséquences radiologiques de toutes les situations de fonctionnement considérées comme possibles des installations de surface doivent non seulement rester inférieures aux limites maximales d'exposition des travailleurs et des populations fixées par la réglementation, mais aussi être les plus basses possible (démarche ALARA). Ces situations de fonctionnement possible sont le fonctionnement normal, qui intègre les opérations de maintenance et les indisponibilités programmées, et les situations de dimensionnement qui concernent tous les événements indésirables, redoutés ou non souhaités, identifiés lors de l'analyse de sûreté et pour lesquels des dispositions de prévention, de surveillance et de limitation de conséquences (Cf. § 2.3) sont prises afin de garantir qu'elles ne conduisent pas à des conséquences inacceptables (impact supérieur aux valeurs de la réglementation).

[34] Le terme « potentielle » signifie que la redondance sera prévue à la conception (réserves dans l'infrastructure par exemple) mais les moyens ne seront pas nécessairement déployés.

L'objectif poursuivi dans le domaine « hors dimensionnement » est de compléter les dispositions prises dans le cadre du dimensionnement pour qu'en cas d'accidents rares mais graves les conséquences soient limitées dans le temps et dans l'espace. Les situations prises en compte sont définies à partir des situations accidentelles de dimensionnement en appliquant des défaillances aggravantes supplémentaires indépendantes de l'événement initiateur. Le but de cette démarche est notamment de vérifier qu'il n'y a pas d'effet de falaise pour les scénarios envisagés en établissant que la dégradation des fonctions de sûreté est progressive.

2.4.1 Situations de dimensionnement

La liste des accidents retenus est détaillée ci-après. Cette liste, préliminaire, est le reflet de l'avancement de la connaissance actuelle de l'installation, des incertitudes sur le site d'implantation et des réflexions à ce stade sur le sujet.

- un séisme de type SMS, (RFS n° 2001-01) :
  - ✓ notamment, dans les ateliers d'entreposage de transit et les concepts d'entreposage complémentaires étudiés des colis,
- la chute d'avion de type CESSNA et LEARJET (RFS I.1.a) selon la zone d'implantation,
  - ✓ notamment, sur les ateliers d'entreposage de transit et les concepts d'entreposage complémentaires étudiés des colis,
- une explosion à proximité des installations, (20 mBar),
- une inondation externe (situations de référence à définir conformément au nouveau Guide Inondation en cours de rédaction),
- un incendie :
  - ✓ d'un camion dans le hall de déchargement des emballages de transport,
  - ✓ d'un équipement électrique dans un local d'entreposage de colis MAVL.
- la chute/collision :
  - ✓ d'un colis primaire lors de son déchargement de l'emballage (9 m),
  - ✓ d'un colis de stockage MAVL lors de sa manutention pour mise en entreposage (entreposage de transit ou entreposage complémentaire) (hauteur maximale de chute non connue à ce stade des études),
- la perte de la ventilation :
  - ✓ dans les ateliers d'entreposage (entreposage de transit ou concepts d'entreposage complémentaires étudiés) des colis de stockage MAVL vis-à-vis des risques liés aux dégagements de gaz de radiolyse (H2),
  - ✓ dans les ateliers d'entreposage de transit des colis primaires ou de stockage HA et vis-à-vis des risques liés aux dégagements thermiques.

Les scénarios accidentels considérés comme potentiellement « enveloppes » en termes de conséquences radiologiques sont la chute de colis et l'incendie.

2.4.2 Situations hors dimensionnement

Les situations « hors dimensionnement » identifiées au stade actuel des réflexions sont :

- un incendie non rapidement maîtrisé dans un local d'entreposage de transit ou d'entreposage complémentaire de colis primaires ou de stockage (incendie se propageant d'un colis à un autre),
- la chute d'un colis aggravée par la défaillance des dispositifs de sécurité sur les systèmes de manutention (au-delà de sa hauteur de qualification), notamment lors des phases de déchargement des colis primaires de l'emballage de transport, le conditionnement des colis primaires en colis de stockage ou leur entreposage (entreposages de transit ou entreposages complémentaires étudiés),
- la perte de maîtrise technique, correspondant à un abandon partiel avec absence de maintenance.

Ces scénarios, à prendre en compte pour l'élaboration du Plan d'Urgence Interne des installations du centre de stockage, seront consolidés d'ici la Demande d'Autorisation de Création.

2.5 Dispositions adoptées en vue du démantèlement

De façon générale et autant que faire se peut, les options choisies à la conception intègreront l'aspect démantèlement des installations en tenant compte du caractère accessible et démontable des composants, de la minimisation des parties aveugles et inaccessibles aux moyens de préhension dans les cellules, du choix d'équipements présentant des états de surface décontaminables, de la définition de cheminements d'évacuation et du transfert de connaissances entre les différentes équipes.

La conservation et la traçabilité de la documentation (plans de conception, suivi des modifications pendant l'exploitation, historique des incidents ou accidents…) permettront de faciliter les opérations en vue du démantèlement. Le zonage sera optimisé de manière à limiter la quantité de déchets susceptibles de contenir des substances radioactives.

2.6 Gestion des déchets et des effluents

La gestion des déchets concerne aussi bien les déchets produits par l'exploitation normale des installations de l'Andra que les déchets qui résulteront de leur démantèlement. Les installations de surface du centre de stockage génèreront des volumes faibles d'effluents liquides et gazeux, et des déchets solides d'exploitation.

2.6.1 Recensement des déchets et effluents générés par les installations

2.6.1.1 Effluents liquides

Les effluents liquides qui peuvent être générés dans les installations de surface seront issus des opérations de lavage des locaux, des opérations éventuelles de décontaminations à réception des colis (emballages de transport, colis contaminés), des opérations de contrôle (du type contrôles) effectuées dans le cadre d'un programme de surveillance, des opérations de collecte suite à une inondation interne ou lors de l'extinction d'un incendie.

Ces effluents seront collectés par un réseau de canalisations qui permettra de les évacuer gravitairement vers des cuves de stockage. Les effluents présents dans les cuves de stockage seront alors contrôlés pour détecter toute contamination. En cas d'effluents contaminés, ceux-ci seront évacués par citerne pour traitement. S'ils ne sont pas contaminés, des analyses devront être réalisées (vis-à-vis de produits chimiques) pour justifier le rejet des effluents vers le réseau d'égout.

2.6.1.2 Effluents gazeux

Les effluents gazeux proviennent essentiellement du dégazage des colis (cf. § 2.3.1.1).

2.6.1.3 Déchets solides

Les installations de surface produiront essentiellement des déchets « technologiques », liés à l'exploitation et à la maintenance des installations elles-mêmes (outils, câbles, films plastiques, etc.). La majorité de ces déchets sera peu radioactive. Ils seront collectés et conditionnés puis évacués vers une filière adaptée (CSFMA ou CSTFA, a priori).

2.6.2 Gestion des déchets

La démarche visant à minimiser les quantités et la radiotoxicité des déchets produits repose essentiellement sur un choix optimisé des matériaux et le confinement des substances contaminantes. L'accent sera mis autant que faire se peut sur la possibilité de réutilisation des équipements après remise à niveau (aspect maintenance).

De plus, un zonage déchet sera défini sur l'installation. Ce zonage des déchets différenciera les locaux engendrant des déchets conventionnels de ceux générant des déchets nucléaires ou catégorisés comme tels (cf. Tableau 2.6-1).

Tableau 2.6-1 Zonage des déchets

Classification	Description	Déchets en sortie
Zone nucléaire Contaminante (ZC)	Locaux qui sont normalement contaminés ou activés	Déchets radioactifs
Zone nucléaire Non Contaminante (ZNC)	Locaux contenant ou ayant contenu des sources radioactives, absence d'activation.	Déchets conventionnels par défaut, déchets radioactifs non contaminants, sans émetteurs de particules pouvant générer une activation
Zone à Déchets Conventionnels (ZDC)	Locaux étrangers à l'utilisation de substances radioactives.	Déchets conventionnels par défaut

Le classement des zones sera effectué, conformément à l'Arrêté du 31 janvier 2006, lorsque les plans de conception des installations seront définis de manière plus détaillée (post-Jalon 2009).

L'inventaire complet de tous les objets ou composants susceptibles d'être activés et/ou contaminés sera effectué dans une phase ultérieure (post-Jalon 2009). Pour chaque type de déchet généré (nature, origine, type de contamination), il conviendra de définir une stratégie de traitement par une filière adaptée. Par la suite, un suivi comptable des volumes de déchets produits sera réalisé et fera l'objet de bilans annuels et d'une étude déchets, révisée régulièrement et constituant un retour d'expérience complet relatif à la gestion des déchets en terme de :

- limitation des volumes de déchets produits,
- connaissance et contrôle des flux et leurs caractéristiques,

amélioration des filières d'élimination afin de favoriser la valorisation matière (ex : métaux) ou énergétique (ex : papiers, chiffons).

3

Options de sûreté des installations souterraines en phase exploitation

3.1	*Préambule*	*162*
3.2	*Rappel des principes fondateurs de l'analyse de sûreté*	*163*
3.3	*Options de sûreté et de conception des installations*	*164*
3.4	*Maitrise des risques*	*206*
3.5	*Situations de dimensionnement et hors dimensionnement*	*249*
3.6	*Dispositions adoptées en vue de la fermeture des installations*	*251*
3.7	*Gestion des déchets et effluents*	*252*

3.1 Préambule

Comme pour toute installation industrielle, les différentes activités du stockage (construction, exploitation, fermeture et réversibilité) peuvent induire des risques pour les personnes, le public ou l'environnement, qu'il est nécessaire de prendre en compte dès la conception.

Pour démontrer la faisabilité du stockage, en complément des études de sûreté à long terme, le Dossier 2005 s'est appuyé sur une étude préliminaire de risques fondée sur une description préliminaire des installations souterraines et des opérations de transferts des colis de stockage depuis la surface. L'évaluation dosimétrique préliminaire en exploitation et l'analyse de risques du Dossier 2005 a mis en exergue certains risques particuliers ayant fait l'objet d'études complémentaires entre 2005 et 2009 compte tenu de leur spécificité ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements et vice versa. Il s'agissait notamment du risque d'explosion lié à l'émission d'hydrogène par certains colis de déchets MAVL, le risque d'incendie en particulier pour les colis MAVL de boues bitumées, le risque de chute de la cage dans le puits de transfert des colis lors d'un transfert et le risque de chute d'un colis MAVL lors de sa mise en alvéole.

L'instruction du Dossier 2005 par différents experts nationaux et internationaux ainsi qu'une revue interne des évolutions possibles de la conception a abouti à une évolution de la conception et des opérations de manutention par rapport à 2005, prenant en compte, dans la mesure du possible, les questionnements soulevés et recommandations formulées. Quelques évolutions notables par rapport au dossier 2005 sont à noter dès à présent et ont nécessité des analyses spécifiques décrites dans ce chapitre. On peut citer à titre d'exemple les évolutions principales suivantes :

- Le transfert des colis par descenderie à la place du puits vertical a été approfondi au regard du risque lié à la chute de cage identifiée dans le Dossier 2005 avec deux modes de transfert actuellement envisagés : le transfert des colis de stockage par des camions ou un funiculaire.
- La possibilité de découpler une partie des installations de surface des installations souterraines au moyen d'une descenderie a été examinée. A titre d'illustration, une descenderie « déroulée » avec une pente de l'ordre de 10 % pourrait offrir une flexibilité d'implantation pour l'entrée de cet ouvrage jusqu'à environ 5 kilomètres par rapport à la zone des puits.
- Les alvéoles MAVL sont passantes avec un positionnement en aval de gaines et galeries dédiées à la ventilation afin de simplifier les circuits de ventilation et positionner les filtres éventuels au plus près de la sortie de l'alvéole.
- Des évolutions sur le mode de transfert des colis de stockage en alvéole MAVL ont été réalisées pour réduire la hauteur de chute des colis et adapter le moyen de manutention à la typologie des colis.

Ainsi, ce chapitre présente les options de sûreté en exploitation relatives à l'exploitation des installations souterraines du stockage en se fondant autant que possible sur le retour d'expérience d'installations comparables. Ce chapitre concerne les activités dans les installations de transfert (puits et descenderie) et les installations souterraines (galeries, alvéoles de stockage).

L'analyse de sûreté a pour objectif d'identifier les dispositions techniques (équipements, options de conception...) et organisationnelles (surveillance) permettant de maîtriser les différents risques en exploitation au regard de la description actuelle des installations présentée dans le document « Options de conception » (cf. Andra 2009c).

Ce chapitre a donc pour objectif de restituer les résultats des analyses de risques conduites, notamment les dispositions techniques et organisationnelles envisagées, les situations de dimensionnement et hors dimensionnement définies à ce stade de la conception, ainsi qu'une première évaluation de l'impact en fonctionnement normal des installations (cf. section 3.5). Auparavant, les bases fondamentales (cf. section 3.2), en support de l'analyse, sont rappelées, celles-ci étant développées dans le chapitre 1, notamment les sections relatives à la démarche de sûreté, aux objectifs de protection et aux fonctions de sûreté. La section 3.3 dédiée à la présentation des options de sûreté, à la description des installations et de leur fonctionnement permet d'asseoir la présentation par la suite de la maîtrise des risques de la section 3.4. Enfin, les dispositions adoptées en vue de la fermeture des installations et de la gestion des déchets induits font l'objet des sections 3.6 et 3.7.

3.2 Rappel des principes fondateurs de l'analyse de sûreté

La démarche de sûreté mise en œuvre pour la conception des installations du stockage repose sur l'application des principes de sûreté suivants : mise en œuvre du principe de défense en profondeur qui prend en compte l'éventualité de défaillances techniques et humaines et la mise en place de lignes de défense pour y faire face et en limiter les conséquences, gestion de la co-activité notamment par une séparation des zones nucléaires des zones travaux, séparation des zones de stockage HA et MAVL, double défaillance non prise en compte dans le dimensionnement, mise en œuvre du principe ALARA dans le cadre de la radioprotection (minimisation de la présence de personnel, développement de moyens permettant la conduite à distance…).

Du point de vue de la sûreté, la démarche vise à montrer la robustesse de la conception de l'installation de stockage des déchets HA et MAVL vis-à-vis des risques susceptibles d'être rencontrés et s'appuie sur l'étude des situations de fonctionnements normal, incidentel et accidentel résultant de l'analyse de ces risques.

Les analyses de risques permettent notamment de définir :

- les dispositions visant à éviter que les agressions d'origine interne et externe ne soient à l'origine d'une situation incidentelle ou accidentelle ;
- les dispositions permettant de gérer les conséquences de ces situations si elles survenaient ;
- les exigences en vue de la conception, et éventuellement les dispositions, garantissant le maintien des fonctions de sûreté dans les situations pour lesquelles elles sont requises.

Les fonctions de sûreté en exploitation, notamment protéger le personnel, le public et l'environnement des risques de dissémination des substances radioactives et d'exposition externe aux rayonnements ionisants, se déduisent des voies d'atteintes et des risques principaux induits par les déchets radioactifs et les risques associés à la co-activité dans les installations souterraines.

Les présentes options de sûreté s'appuient sur les études et modélisations (chute de colis, collision d'engins, incendie de véhicules), sur les essais disponibles (chute de colis), sur les démonstrateurs et sur le retour d'expérience disponible dans des installations similaires nationales, y compris le laboratoire souterrain (mise en place du soutènement, REX des études de sécurité incendie...) et l'espace technologique du Centre Meuse haute Marne (essais de mise en place des colis HA…), et internationales (programme européen ESDRED, expérimentations dans les laboratoires souterrains de Mol et du Mont Terri, retour d'expérience SKB sur les moyens de transport des colis…).

Dans ce cadre, les principes suivants sont visés pour la conception des installations :

- fondement du processus de conception et de la démonstration de sûreté des installations sur le concept de défense en profondeur et mise en œuvre de ce concept par le biais notamment de barrières à interposer entre les substances radioactives et l'environnement ;
- conception s'appuyant dans la mesure du possible sur des dispositions techniques ayant déjà fait leurs preuves ;
- optimisation de la dosimétrie des personnels et du public, à savoir :
  - ✓ garantir pour les situations normales et incidentelles que l'exposition du personnel est maîtrisée, aussi basse que raisonnablement possible et en tout état de cause inférieure aux contraintes fixées ;
  - ✓ garantir en situations normales et incidentelles que l'exposition du public aux nuisances potentiellement générées par les installations est maîtrisée et en tout état de cause inférieure aux contraintes fixées ;
- évaluation des conséquences d'événements ou d'agressions, d'origines interne ou externe, et de la limitation des conséquences par l'adoption de mesures prises dans le cadre de la défense en profondeur (cf. chapitre 1), l'objectif visé étant qu'aucune contre-mesure impliquant la population ne soit nécessaire ;
- réduction autant que raisonnablement possible de la production de déchets et d'effluents ;
- prise en compte des facteurs humains et organisationnels ;
- prise en compte des conditions de surveillance, des opérations de maintenance et du démantèlement et fermeture des installations et ouvrages ;

- prise en compte des risques inhérents à la problématique de la durée d'exploitation des installations par le choix de systèmes aussi passifs que possible et de maintenance réduite.

On s'assurera que les agressions retenues ne remettent pas en cause l'analyse des situations accidentelles, pour lesquelles les conséquences doivent rester inférieures aux objectifs proposés (cf. chapitre 1).

3.3 Options de sûreté et de conception des installations

Comme pour le Dossier 2005, l'installation souterraine est implantée sur un seul niveau de la formation hôte avec des modules HA et MAVL séparés. Les distances entre modules permettent d'éviter toute interaction chimique entre les modules MAVL et thermique entre les modules MAVL et HA. Cette séparation constitue aussi un avantage relativement à la gestion de l'exploitation. Une précision est nécessaire, compte tenu de l'emprise des installations souterraines du stockage, le pendage de la formation conduit à des dénivellations entre les différentes zones du stockage (cf. Andra 2009f) ; les galeries de transfert des colis auront une pente maximale de l'ordre de 3 %, tandis que les alvéoles de stockage seront horizontales afin de minimiser les risques liés à la mise en stockage des colis (cf. section 3.4.3.2).

Les principaux composants du stockage sont présentés individuellement avant de présenter l'architecture dans son ensemble suivie des systèmes étudiés pour le transfert et la mise en alvéole des colis. Pour chacun d'eux, les fonctions de sûreté à assurer sont données, celles-ci ayant guidé les options retenues (cf. Andra 2009c). Il est à noter que les études de conception ont été focalisées sur la descenderie, les galeries de liaisons et les accès aux alvéoles ; la zone centrale fera l'objet d'études plus détaillées à partir de 2010 en vue de la demande d'autorisation de création.

Les ouvrages de liaison et d'accès aux alvéoles ont pour fonction de permettre le transfert des flux engendrés par les activités de construction, puis la mise en stockage des colis et la fermeture des installations souterraines. Leur conception est largement fondée sur les besoins opérationnels de ces activités. Elle intègre également les exigences liées à la sûreté en exploitation, après fermeture et à la réversibilité.

3.3.1 Les colis de stockage

3.3.1.1 Colis de stockage MAVL

Exigences de sûreté

Le colis de stockage MAVL participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ Les colis primaires assurent le confinement des substances radioactives.
  - ✓ L'enveloppe du colis de stockage MAVL n'assure pas directement cette fonction de sûreté mais participe au maintien du confinement du colis primaire de déchets: (i) en fonctionnement normal, par sa tenue mécanique pour la manutention et le gerbage, et (ii) en fonctionnement accidentel en le protégeant des effets des agressions d'origine interne et externe.
- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ L'enveloppe du colis de stockage contribue à réduire le débit de dose au niveau du colis de stockage et participe à cette fonction.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ Le colis de stockage doit évacuer les gaz de radiolyse émis par les colis primaires.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ En situation normale, l'enveloppe du colis de stockage participe à la maîtrise de la criticité.
  - ✓ La sélection des colis primaires lors de leur conditionnement et de leur stockage assure l'absence de risque de criticité en phase d'exploitation.
  - ✓ Les caractéristiques du colis de stockage sont prises en compte dans les études de criticité menées en phase exploitation. Les évolutions du colis au cours de sa conception, sa fabrication et son exploitation ne doivent pas remettre en cause les conclusions de ces études.

- ✓ En situation accidentelle, la fonction de protection du colis primaire par le colis de stockage participe à la maîtrise du risque de criticité.

- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ Le colis de stockage participe à cette fonction. Il doit être conçu pour que la puissance thermique des colis primaires ne modifie pas ses performances.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- La conception du colis de stockage doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, émission de gaz, évolution du déchet dans le temps…) et de leur effet que ce soit en situations normale, incidentelle ou accidentelle ;
- La qualité de conception et de fabrication du colis de stockage doit garantir sur la période de l'exploitation de l'installation un maintien de ses caractéristiques mécanique, chimique et géométrique assurant ainsi la protection du colis primaire vis-à-vis des agressions.

De plus, afin de satisfaire l'exigence de réversibilité sans remettre en cause l'atteinte des objectifs de sûreté, le maintien de l'intégrité du colis de stockage est requise sur une période a minima séculaire.

Options de sûreté

Pour couvrir la grande diversité des colis de déchets MAVL de l'inventaire en termes de contenus, de conditionnement et de dimensions géométriques (cf. chapitre 1), il est proposé une conception « standardisée » des colis de stockage de forme parallélépipédique permettant de simplifier les opérations de manutention et d'empilage, tout en limitant le taux de vide dans l'alvéole de stockage. Les colis primaires de déchets MAVL sont, pour la plupart, irradiants. Ce complément de colisage contribue à la radioprotection, mais ne permet pas, dans la grande majorité des cas, de conduire les opérations de manutention sans protection supplémentaire compte tenu du niveau d'irradiation. Il participe aussi à la protection des colis primaires dans les situations accidentelles de chute/collision et d'incendie afin de limiter la dispersion de substances radioactives dans les installations et l'environnement.

Le complément de colisage des déchets permet de simplifier et de rendre plus fiable la mise en stockage des déchets. D'une part un regroupement des plus petits colis primaires dans des colis de stockage de plus grande capacité réduit les flux d'objets manutentionnés dans les alvéoles. D'autre part le complément de colisage standardise les dimensions et les modes de préhension de ces objets, ce qui facilite l'automatisation du processus de transfert et de mise en stockage (l'alvéole est interdite au personnel, compte tenu du niveau d'irradiation).

Des variantes de conception principalement orientées sur la partie interne du colis de stockage et son mode de fermeture sont envisagées et développées notamment pour les colis primaires de déchets en faible volume et pour ceux relâchant des gaz de radiolyse. Pour ces derniers, le risque de concentration excessive en gaz explosifs dans le conteneur peut être évité par la réalisation d'évents dans le complément de colisage. Leur position en face latérale et leur forme éviterait que l'eau ne pénètre par projection ou écoulement dans le colis. On notera que, tant que le béton se trouve en atmosphère sèche, la seule porosité du béton permettrait une évacuation suffisante de l'hydrogène (résultats à corroborer après 2010 à partir d'un démonstrateur à échelle 1).

Conception générique

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

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

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

en environnement radioactif. Ce joint a pour objectif principal de réaliser une jonction entre le corps et le couvercle et assurera une étanchéité de la face supérieure du colis.

Les colis de stockage (cf. Figure 3.3-1) sont adaptés à une mise en stockage « individuelle » des colis ou à une mise en stockage « après pré empilage ». Le premier type de colis correspond à des colis de masse de l'ordre de 7 à 15 tonnes. La masse des colis du second type, plus importante, peut atteindre 25 tonnes. Il est prévu de les empiler sur deux ou trois niveaux dans les alvéoles de stockage, avec un mode de préhension par le dessous.

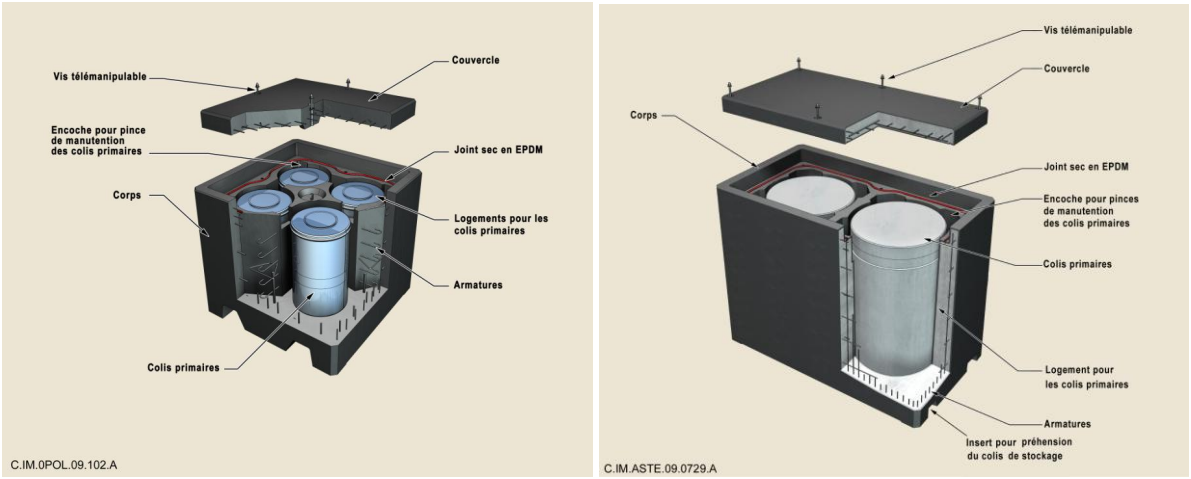


Figure 3.3-1 *Colis de stockage associé à une manutention « individuelle » (à gauche) et Colis de stockage associé à une manutention « avec pré-empilage » (à droite)*

Variantes de conception

D'autres conceptions de colis de stockage (cf. Figure 3.3-2) sont également considérées pour prendre en compte des situations spécifiques :

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

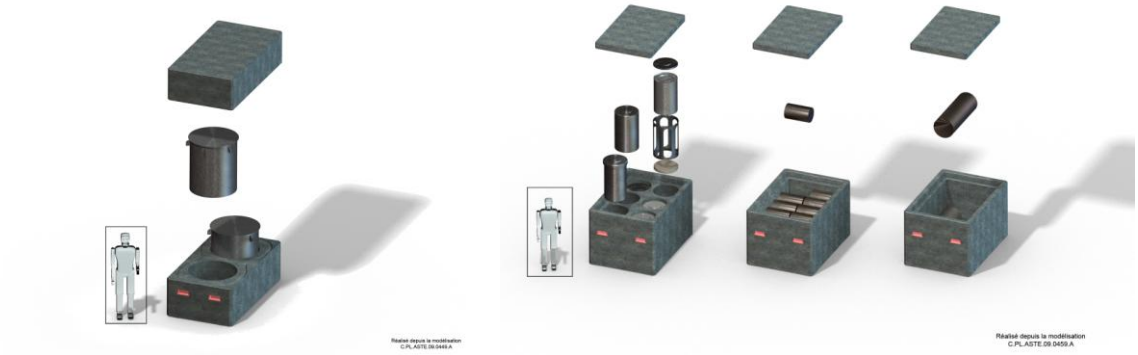


Figure 3.3-2 *Colis de stockage avec couvercle coiffant (à gauche) et Colis de stockage sans logements internes (à droite)*

Standardisation et co-stockage

Le modèle d'inventaire des déchets (cf. Andra 2009d) répertorie une centaine de famille de colis dont les dimensions sont très variables. La gestion d'une telle diversité de dimensions dans une installation

unique est source de complexité. Une des fonctions du colis de stockage consiste à apporter une standardisation géométrique (dimensions externes du colis) qui doit permettre de :

- faciliter la gestion des flux entre la surface et les alvéoles de stockage (utilisation de moyens de transfert et manutention communs) ;
- simplifier la réalisation des alvéoles, par une meilleure standardisation de leurs dimensions excavées (tout en minimisant les vides et facilitant la récupérabilité des colis pour la réversibilité).

Un objectif lié à cette standardisation consiste à favoriser un éventuel co-stockage de certains colis de déchets dans une même alvéole. Le co-stockage permet de stocker des colis dont l'inventaire est faible dans une alvéole non dédiée. Ce procédé nécessite que les colis de stockage d'une même alvéole présentent des caractéristiques dimensionnelles (hauteur, dimension suivant l'axe transversal de l'alvéole, position et caractéristiques des points de manutention) identiques de manière à :

- limiter les vides résiduels dans les alvéoles pour répondre aux exigences de sûreté après fermeture ;
- ne pas perturber le flux de ventilation de la partie utile de l'alvéole de stockage ;
- standardiser la manutention des colis de stockage permettant ainsi d'augmenter la fiabilité de la manutention et de minimiser les dispositifs de surveillance.

La stratégie de limitation du nombre de colis de stockage différents s'articule autour de l'association, pour chaque colis type ou famille de déchets, d'un conteneur de stockage type et d'une alvéole type.

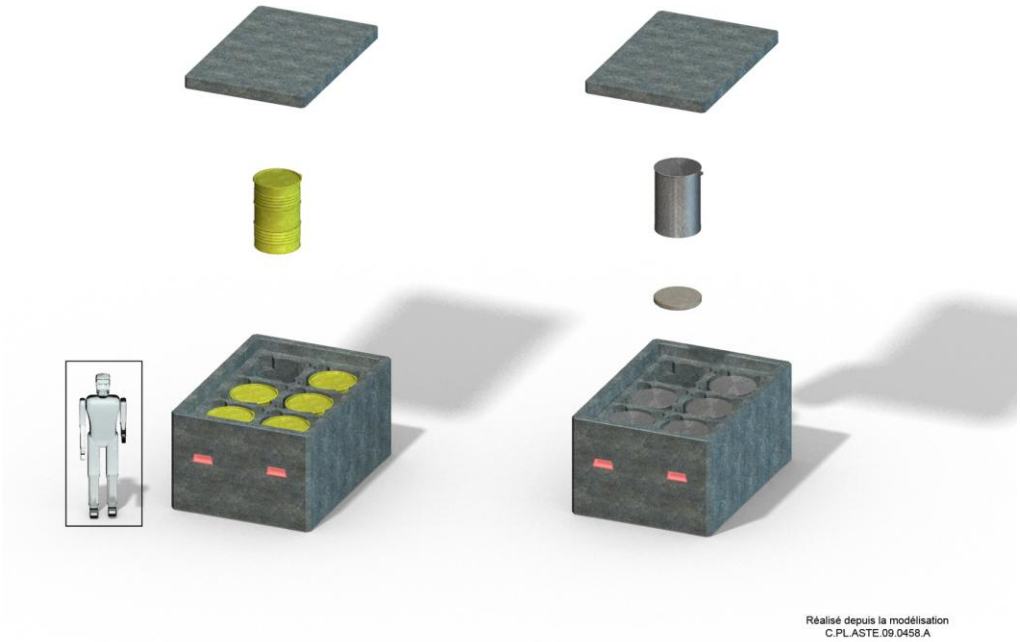


Figure 3.3-3 *Exemple de « colis de stockage standard » : conteneur optimisé (à gauche) et conteneur standardisé de mêmes dimensions externes (à droite)*

La Figure 3.3-3 ci-dessus est un exemple de deux colis proches dimensionnellement et dont les caractéristiques physico-chimiques permettent leur stockage dans une même alvéole. La vue de gauche présente un colis de stockage optimisé. Les dimensions du logement pour le colis de déchet sont parfaitement ajustées au niveau du diamètre et de la hauteur. La vue de droite présente la version "standardisée" pour un colis de déchet légèrement différent. Dans ce cas, le colis de déchet est de diamètre quasiment identique mais sa hauteur légèrement inférieure. Le colis de stockage est en tout point identique à la version optimisée. Le fond de colis sera donc pourvu de rehausseurs en béton afin de ne pas augmenter le vide dans le colis. Ces déchets différents placés dans un conteneur identique pourront ainsi être stockés dans une même alvéole de stockage.

3.3.1.2 Colis de stockage HA de déchets vitrifiés

Exigences de sûreté

Le colis de stockage HA participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ Les colis primaires assurent le confinement des substances radioactives.
  - ✓ Le surconteneur HA de déchets vitrifiés n'assure pas directement cette fonction de sûreté mais participe au maintien du confinement du colis primaire de déchets: (i) en fonctionnement normal, par sa tenue mécanique pour la manutention et le gerbage, et (ii) en fonctionnement accidentel en le protégeant des effets des agressions d'origine interne et externe.
  - ✓ Le surconteneur doit protéger les déchets vitrifiés HA (ou les combustibles usés) d'une éventuelle arrivée d'eau pendant la phase dite « thermique » du colis.
- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ Le surconteneur contribue à réduire le débit de dose au niveau du colis de stockage et participe à cette fonction.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ Les déchets contenus dans les colis HA ne produisent pas de gaz de radiolyse.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ En situation normale, l'enveloppe du colis de stockage participe à la maîtrise de la criticité.
  - ✓ La sélection des colis primaires lors de leur conditionnement et de leur stockage assure l'absence de risque de criticité en phase d'exploitation.
  - ✓ Les caractéristiques du colis de stockage sont prises en compte dans les études de criticité menées en phase exploitation. Les évolutions du colis au cours de sa conception, sa fabrication et son exploitation ne doivent pas remettre en cause les conclusions de ces études.
  - ✓ En situation accidentelle, la fonction de protection du colis primaire par le colis de stockage participe à la maîtrise du risque de criticité.
- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ Le colis de stockage HA participe à cette fonction. Il doit être conçu pour que la puissance thermique des colis primaires ne modifie pas ses performances.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- La conception du colis de stockage doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution du déchet dans le temps…) et de leur effet que ce soit en situation normale ou accidentelle ;
- L'enveloppe du colis de stockage doit être étanche à l'eau ;
- La qualité de conception et de fabrication du colis de stockage doit garantir sur la période de l'exploitation de l'installation un maintien de ses caractéristiques mécanique, chimique et géométrique assurant la protection du colis primaire vis-à-vis des agressions, assurant l'absence de risque de criticité et l'absence d'endommagement (physique, chimique ou thermique) du colis primaire.

De plus, afin de satisfaire l'exigence de réversibilité sans remettre en cause l'atteinte des objectifs de sûreté, le maintien de l'intégrité du colis de stockage est requise sur une période a minima séculaire.

Options de sûreté/conception

Les colis de stockage doivent accueillir des colis de déchets fortement irradiants parmi lesquels on distingue des déchets moyennement exothermiques (C0) à fortement exothermiques (autres colis HA) (cf. Andra 2009d).

Le colis de stockage est constitué d'un surconteneur, son besoin découle des exigences en matière de sûreté à long terme et en particulier pour satisfaire la fonction « interdire l'arrivée d'eau au contact du verre pendant la période thermique caractérisée par une température supérieure à 50 °C », comme défini dans le Dossier 2005 Argile et repris dans le chapitre 4.

Ce surconteneur est constitué d'une virole en acier non allié de 55 mm d'épaisseur, cette épaisseur couvre aussi les contraintes d'exploitation, il assure notamment l'absence de dissémination lors d'opérations de mise en place des colis et, le cas échéant, de retrait dans le cadre de la réversibilité. Ce complément de colisage contribue à satisfaire les objectifs de protection, mais ne permet pas de conduire les opérations de manutention sans protection supplémentaire compte tenu du niveau d'irradiation. Il participe aussi à la protection des colis primaires dans les situations accidentelles de chute/collision et d'incendie afin de limiter la dispersion de substances radioactives dans les installations et l'environnement.

La masse de ce colis (colis primaire et ensemble des constituants du surconteneur) est de l'ordre de 2 tonnes. Sa manutention est assurée par une gorge de préhension usinée directement dans le couvercle de fermeture du surconteneur. La résistance de l'enveloppe et de la gorge de manutention du surconteneur ont été respectivement vérifiées en analysant les contraintes calculées pour différentes sollicitations, suivant les prescriptions du Code de Construction des Appareils à Pression (CODAP) et les règles préconisées par la Fédération Européenne de la Manutention (FEM). L'épaisseur de 55 mm offre une résistance mécanique supérieure à celle requise pour la manutention.

Le colis de stockage est doté de patins en céramique inerte évitant un contact direct acier/acier entre le surconteneur et le chemisage des alvéoles de stockage. Cette disposition facilite les opérations de mise en place mais aussi d'un retrait éventuel, en améliorant le glissement du colis lors de sa manutention horizontale dans l'alvéole de stockage.

Les procédés de réalisation du surconteneur ont été choisis pour limiter les facteurs de corrosion localisée induite par le processus de fabrication. La qualité métallurgique des composants du surconteneur est ensuite vérifiée durant toutes les étapes de la fabrication (analyse chimique, essais mécaniques sur éprouvettes, contrôle ultrasons...) suivant des procédures qualifiées et normalisées en fonction du processus de fabrication retenu.

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

Plusieurs niveaux de contrôle interviennent tout au long du procédé d'assemblage, avant, durant et après le soudage. Avant le soudage, le contrôle consiste à vérifier les qualités géométriques, structurelles et magnétiques des zones à souder (partie surconteneur et partie couvercle). Pendant le soudage, un enregistrement des paramètres de soudage par faisceau d'électrons est effectué. Cette phase permet de mettre en évidence les dysfonctionnements éventuels lors du soudage et de garder une traçabilité sur les opérations effectuées. Après le soudage, le contrôle permet de vérifier la qualité de l'assemblage, notamment au niveau de la soudure. Deux types de contrôles sont envisagés, fondés sur le retour d'expérience : un contrôle de surface visuel par caméra et un contrôle volumique par ultrasons.

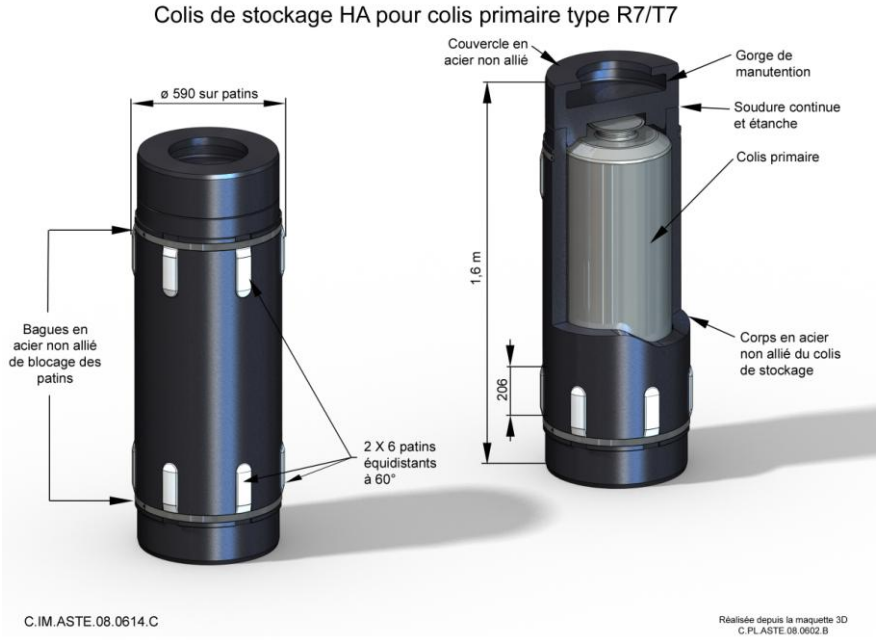


Figure 3.3-4 Colis de stockage HA de déchets vitrifiés

3.3.1.3 Colis de stockage HA de combustibles usés (CU3)

Les exigences de sûreté requises pour la conception de ce colis de stockage sont identiques à celles requises pour le colis de stockage HA de déchets vitrifiés.

Un conteneur de stockage similaire à celui des colis HA, en particulier les colis C0 (cf. Figure 3.3-5), est envisagé pour les combustibles usés de type CU3 qui, non retraités, seraient considérés comme des déchets ultimes de Haute Activité. Les combustibles usés CU3 sont conditionnés en étuis étanches, ce qui permet de limiter la contamination surfacique des surconteneurs. Les raisons justifiant la présence d'un surconteneur sont similaires à celles pour les déchets vitrifiés, celui-ci participant à satisfaire les objectifs de radioprotection (avec une protection supplémentaire compte tenu du niveau d'irradiation) et contribuant aussi à la protection des colis primaires dans les situations accidentelles de chute/collision et d'incendie afin de limiter la dispersion de substances radioactives dans les installations et l'environnement.

Son épaisseur couvre les contraintes d'exploitation, notamment d'assurer l'absence de dissémination lors d'opérations de mise en place des colis et, le cas échéant, de retrait dans le cadre de la réversibilité pendant la phase d'exploitation et de réversibilité.

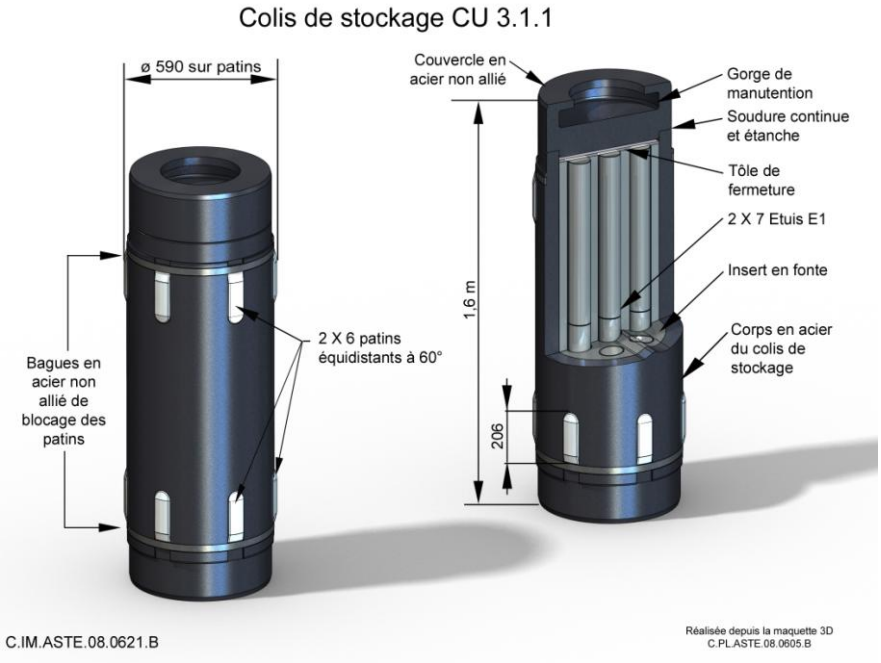


Figure 3.3-5 Colis de stockage HA de combustibles usés CU3

3.3.2 Les hottes de radioprotection

Il a été retenu de transférer les colis de stockage, depuis leur chargement dans les installations de surface jusqu'à leur introduction dans les alvéoles de stockage, à l'intérieur de hottes de transfert. Ces hottes comprennent une enceinte blindée de radioprotection dotée d'une porte et d'une structure support.

3.3.2.1 Exigences de sûreté

Les hottes de radioprotection participent à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ Les hottes de radioprotection participent à cette fonction au travers de la protection des colis de stockage vis-à-vis des risques susceptibles de porter atteinte au confinement assuré par les colis primaires.
- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ Les hottes de radioprotection assurent la fonction de protection des personnes contre les rayonnements ionisants en limitant les doses au niveau de la hotte lors des opérations de transfert et de manutention.
- Evacuer les gaz de radiolyse émis par les colis de stockage :
  - ✓ Les hottes de radioprotection HA ne participent pas à cette fonction.
  - ✓ Les hottes de radioprotection MAVL ne participent pas directement à cette fonction. Toutefois, en cas d'immobilisation prolongée, la hotte doit permettre l'évacuation des gaz de radiolyse.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ Les hottes de radioprotection ne participent pas à cette fonction.
- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ Les hottes de radioprotection participent à cette fonction. Elles doivent être conçues pour que la puissance thermique des colis primaires ne modifie pas ses performances et celles des colis de stockage.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- La conception des hottes de radioprotection doit respecter des objectifs de radioprotection et la limitation de l'exposition externe du personnel associée à la démarche ALARA conformément aux objectifs fixés au chapitre 1 et conduit à interposer des protections radiologiques entre les colis de stockage et le personnel ;
- La qualité de conception et de fabrication des hottes de radioprotection doit garantir sur la période de l'exploitation de l'installation un maintien de leurs caractéristiques mécanique, chimique et géométrique afin d'assurer un endommagement limité, que ce soit physiquement ou chimiquement, du colis de stockage.

3.3.2.2 Protections radiologiques

Les colis MAVL, HA vitrifiés et CU3 sont acheminés jusqu'aux alvéoles de stockage à l'intérieur d'une enceinte blindée dont les parois sont constituées d'écrans en acier et en Polypropylène Compound. L'épaisseur et la position de ces écrans sont adaptées au Débit Equivalent de Dose de chaque type de colis de stockage pour respecter la contrainte de dose annuelle fixée par l'Andra pour un poste de travail d'un opérateur.

Les caractéristiques et la nature des rayonnements émis par les déchets MAVL, HA vitrifiés ou par les CU3 déterminent le choix des matériaux constituant la paroi des hottes. Les déchets qui émettent des rayonnements gamma sont mis dans des hottes constituées de matériaux de densité élevée (acier carboné). Les déchets qui émettent des rayonnements neutroniques nécessitent en complément une protection dite "neutrophage". Cette dernière est constituée de matériaux contenant une forte densité de noyaux d'hydrogène engendrant le ralentissement des neutrons par choc élastique et d'un matériau dont les noyaux des atomes capturent les neutrons ainsi ralentis. Le matériau neutrophage retenu est du type de « Polypropylène Compound » dans lequel le polypropylène assure le ralentissement des neutrons tandis que le bore capture ces derniers. Ce matériau est préféré au PPB (Plâtre de Polyéthylène Boré) en raison de sa moindre sensibilité thermique.

Ces écrans contribuent également à la protection des colis en situation accidentelle (chute, collision, incendie) lors du transfert entre la surface et le fond : maintien du confinement des radionucléides, maîtrise de l'élévation de température au niveau des colis.

3.3.2.3 Description de la hotte de transfert HA

La hotte de transfert des colis HA (cf. Figure 3.3-6) comprend :

- l'enceinte blindée ;
- un système de poussée pour l'extraction ou la réintroduction d'un colis HA dans l'enceinte blindée ;
- la structure porteuse de l'enceinte et des équipements d'exploitation du système de poussée.

Selon le type de colis de stockage (géométrie et masse), et le type de protection radiologique intégrée au blindage de la hotte, la masse de la hotte est comprise entre 30 et 40 tonnes. En face avant, l'enceinte est équipée d'une porte blindée dotée d'une ouverture cylindrique, au diamètre de l'alvéole. En situation de transfert, la porte est fermée et verrouillée. Sa structure et son épaisseur assurent le même niveau de protection radiologique que l'enceinte blindée. En situation accostée à une alvéole, l'accouplement mécanique de l'enceinte au dormant de l'operculaire d'alvéole assure la continuité de la protection radiologique au moment du passage d'un colis entre l'alvéole et l'enceinte blindée. L'ouverture cylindrique permet d'assurer la continuité de la piste de glissement du colis entre le corps de l'enceinte et la tête de l'alvéole.

En partie supérieure de l'enceinte blindée, où est disposé le magasin de l'actionneur de poussée (une chaîne pousseuse), la continuité de la protection radiologique est assurée par un chicanage.

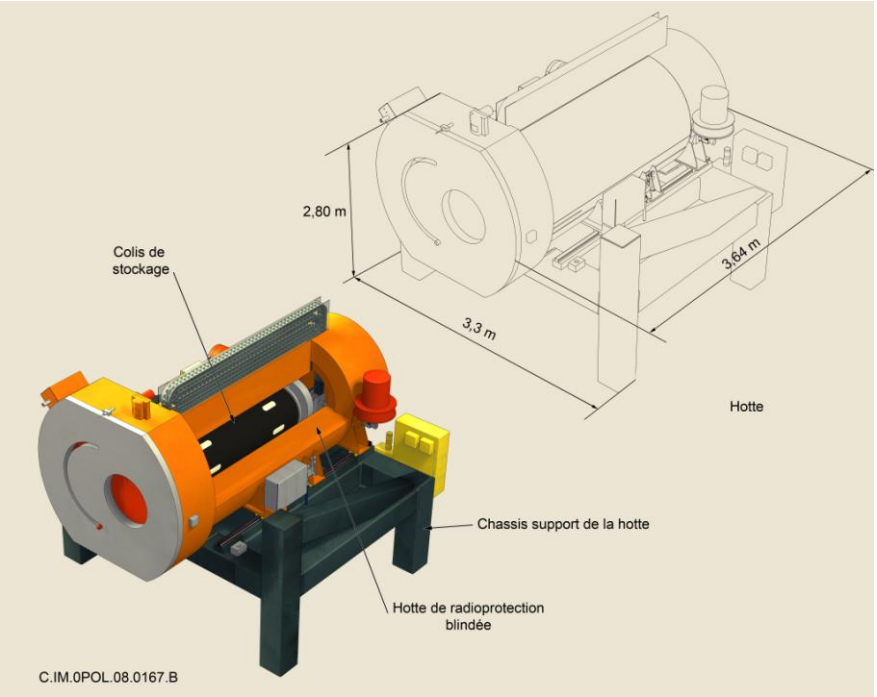


Figure 3.3-6 Hotte de transfert des colis HA (avec système externe de mise en alvéole des colis et ouverture rotative)

A titre d'exemple pour le cas des colis de stockage HA (C1, C5 et C6), le respect des contraintes de dose retenues pour le dimensionnement nécessite une épaisseur latérale de l'enceinte de protection radiologique de l'ordre de 390 mm. Elle comprendrait un écran de Polypropylène Compound de 130 mm d'épaisseur. En faces avant et arrière de la hotte, cette épaisseur serait de l'ordre de 340 mm avec 100 mm de Polypropylène Compound.

Dans le cas des colis C0 (C0.1 à C0.3 qui n'émettent pas de neutron), l'écran de Polypropylène Compound ne serait pas nécessaire. L'épaisseur latérale de la hotte pourrait être de 270 mm et, en faces avant et arrière, de 230 mm en acier.

3.3.2.4 Description de la hotte de transfert MAVL

La hotte de transfert MAVL est constituée d'une embase de manutention sur pieds, surmontée d'une enceinte blindée. Suivant le concept de manutention (pré-empileur, chariot à fourche ou pont gerbeur), elle est équipée ou non d'un dispositif mécanique de poussée pour l'introduction du colis de stockage dans la cellule de manutention.

Compte tenu des dimensions des colis de stockage et de l'épaisseur des protections radiologiques, les hottes utilisées pour le transfert des colis de stockage sont conçues pour contenir un seul colis de stockage.

La hotte de protection biologique des colis de stockage MAVL est caractérisée par une enceinte blindée parallélépipédique et un système de portes à deux vantaux coulissants (cf. Figure 3.3-7). La hotte dédiée au concept du chariot à fourches ne comporte aucune mécanique embarquée car les opérations de chargement et de déchargement sont assurées par le chariot à fourches lui-même. La hotte dédiée aux deux autres concepts (pré-empilage, pont gerbeur) comporte une mécanique d'introduction et d'extraction qui lui permet de charger le colis dans les installations de surface et de le transférer au fond dans la cellule de manutention située en tête d'alvéole. Ce système permet également de récupérer un colis de stockage placé en alvéole et de le redéposer dans les installations de surface lors d'une éventuelle opération de retrait, toutes caractéristiques du colis de stockage égales par ailleurs.

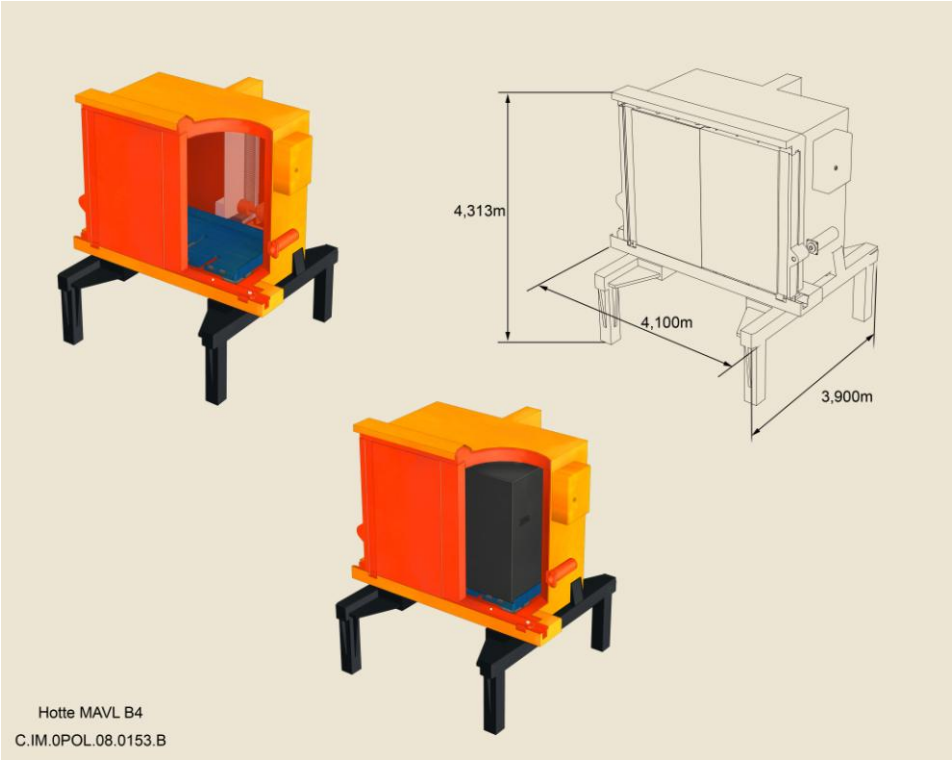


Figure 3.3-7 Hotte pour colis MAVL de type B4

L'existence de plusieurs types de colis de stockage de déchets MAVL, en termes de dimensions, de masses et de débits d'équivalent de dose a conduit à définir six familles de hottes. Les hottes sont en acier (épaisseur variant entre 100 et 300 mm) à l'exception d'une famille de hotte conçue avec des parois composites (260 à 310 mm acier + 80 mm matériau neutrophage + 20 mm acier). Leur masse en charge est de l'ordre de 100 tonnes avec une valeur maximale de l'ordre de 130 tonnes.

3.3.3 Les ouvrages de liaison surface/fond

Exigences de sûreté

Les ouvrages de liaison surface/fond participent à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ Les liaisons surface/fond contribuent indirectement à l'accomplissement de cette fonction par la maîtrise des risques susceptibles d'entraîner la dispersion de substances radioactives.
  - ✓ Les liaisons surface/fond assurent le confinement statique des substances radioactives relâchées par un colis de stockage pour toutes les situations accidentelles aboutissant à sa perte de confinement.
  - ✓ Les liaisons surface/fond permettent la circulation de l'air de la ventilation nucléaire éventuellement nécessaire au confinement dynamique des installations souterraines.
- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ Les liaisons surface/fond ne participent pas à cette fonction.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ Les liaisons surface/fond assurent la circulation de l'air de la ventilation permettant ainsi l'évacuation des gaz de radiolyse des installations souterraines.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ Les liaisons surface/fond ne participent pas à cette fonction.

- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ Les liaisons surface/fond assurent la circulation de l'air de la ventilation qui évacue la puissance thermique des colis de déchets.

L'exigence à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions est la suivante : la configuration et la conception des liaisons surface/fond doivent limiter autant que possible les risques d'endommagement des colis de stockage qui empruntent ces liaisons et les risques pouvant affecter le fonctionnement de la ventilation. Notamment les risques relatifs à la co-activité entre exploitation nucléaire et travaux doivent être pris en compte au travers de la configuration de ces liaisons.

Options de sûreté/conception

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

- un tube de la descenderie exclusivement réservé au *transfert des colis* ; le second tube de la descenderie pourra assurer des flux limités de matériels et/ou de personnel et servir comme issue de secours pour l'ensemble des installations souterraines du stockage ;
- deux puits réservés exclusivement au *retour d'air*, pour assurer l'ensemble des retours d'air et des désenfumages. Un puits est dédié spécifiquement à la zone MAVL, le second prenant en charge les autres zones de stockage et l'ensemble des infrastructures ;
- un *puits de personnel* et un *puits de travaux* pour assurer l'ensemble des autres flux, y compris l'alimentation des installations souterraines en air frais.

Cette configuration permet une séparation des flux de transfert des colis (descenderie dédiée) de ceux liés aux travaux de construction des ouvrages souterrains (puits de travaux et second tube de la descenderie). Elle permet aussi de séparer les flux de personnel (puits dédié et second tube de la descenderie) des flux de transfert des colis (descenderie dédiée). Les flux de ventilation empruntent les ouvrages de liaison décrits précédemment pour ce qui concerne l'arrivée en air neuf et possèdent un retour d'air séparé et dédié, l'un à la zone MAVL, l'autre le reste des installations.

Le transfert des colis en descenderie est envisageable avec des véhicules sur pneumatiques et également avec un funiculaire. Les descenderies sont des galeries inclinées généralement de pente inférieure ou égale à 12%. Le funiculaire est adapté à cette même pente mais pourrait aussi être utilisé pour des pentes plus importantes, si nécessaire jusqu'à 30%.

La solution « puits » du Dossier 2005 pour le transfert des colis n'est pas écartée techniquement, mais elle demande des développements technologiques importants compte tenu des masses transportées (masses transportées jusqu'à 120 t plus importantes qu'usuellement, puisqu'il y a peu de références de transport de charges supérieures à 50 t).

On notera que si, en surface, les puits sont implantés à l'aplomb du stockage, l'accès en surface de la descenderie peut être implanté dans une seconde zone d'installations de surface[35] (cf. chapitre 2).

3.3.4 La zone centrale et les infrastructures de liaison

Exigences de sûreté

La zone centrale et les infrastructures de liaison participent à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ La zone centrale et les infrastructures de liaison contribuent indirectement à l'accomplissement de cette fonction par la maîtrise des risques susceptibles d'entraîner la dispersion de substances radioactives.

[35] La distance entre les deux zones d'installations de surface est fonction du tracé et de la pente de la descenderie. On considère, en première approche, que la pente de la descenderie est de 10% et que son tracé est rectiligne ; la tête de la descenderie est par conséquent située à environ 5 km de la zone d'installations de surface à l'aplomb de la zone centrale.

- ✓ La zone centrale et les infrastructures de liaison permettent la circulation de l'air de la ventilation nucléaire éventuellement nécessaire au confinement dynamique des installations souterraines.

- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ La zone centrale et les infrastructures de liaison ne participent pas à cette fonction.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ La zone centrale et les infrastructures de liaison assurent la circulation de l'air de la ventilation permettant ainsi l'évacuation des gaz de radiolyse des installations souterraines.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ La zone centrale et les infrastructures de liaison ne participent pas à cette fonction.
- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ La zone centrale et les infrastructures de liaison assurent la circulation de l'air de la ventilation qui évacue la puissance thermique des colis de déchets.

L'exigence à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions est la suivante : la configuration et la conception de la zone centrale et des infrastructures de liaison doivent limiter autant que possible les risques d'endommagement des colis de stockage qui empruntent ces liaisons et les risques pouvant affecter le fonctionnement de la ventilation. Notamment les risques relatifs à la co-activité entre exploitation nucléaire et travaux doivent être pris en compte au travers de la configuration de ces installations.

Options de sûreté/conception

La *zone centrale* constitue l'interface entre les ouvrages de liaison surface/fond communs à l'ensemble du stockage et les galeries de liaison aux zones de stockage. La Figure 3.3-8 présente un schéma illustratif de la zone centrale, à son extension maximale. Elle est à ce stade des études implantée au centre du stockage et est organisée autour des quatre fonctionnalités suivantes qui permettent une séparation des flux et des zones nucléaires/travaux :

- la réception et l'évacuation des matériaux de construction (déblais, bétons, remblais, matériels et matériaux divers) ;
- la réception des hottes de transfert des colis pleines et vides ;
- le support au fonctionnement des installations souterraines ;
- l'amenée et le retour d'air.

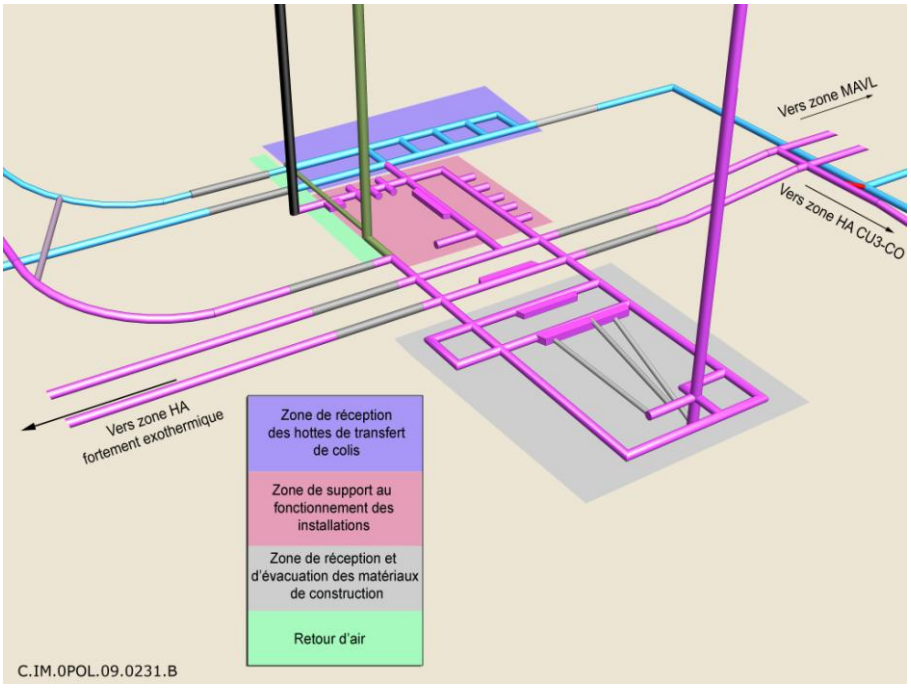


Figure 3.3-8 Ensemble de la zone centrale

La zone centrale est reliée aux modules de stockage par des *infrastructures de liaison*, constituées de faisceaux de galeries de liaison parallèles, dont le nombre varie selon les flux à gérer. Cet ensemble est hiérarchisé en *galeries de liaison principales*, qui relient la zone centrale aux différentes sous-zones de stockage, et en *galeries de liaison secondaires*, à l'intérieur de chaque sous-zone. Cette hiérarchisation facilite la souplesse de construction et d'exploitation du stockage en rendant indépendantes les différentes sous-zones. Une spécialisation des galeries entre *galeries de transfert des colis*, *galeries de travaux*, et suivant les besoins, *galeries de retour d'air*, contribue à la gestion de la co-activité entre les activités nucléaires et les activités de génie civil.

Les faisceaux de galeries de liaison (principales et secondaires) sont constitués de deux à trois galeries parallèles (une galerie de transfert de colis et une ou deux galeries de travaux) reliées par des recoupes régulièrement espacées permettant l'évacuation du personnel en cas d'incendie. Les galeries dédiées au transfert des colis ont une pente faible (entre 0 et 3%) afin de prévenir les risques de dérive des véhicules de transfert et les conséquences des situations associées.

Les faisceaux de galeries qui constituent les infrastructures de liaison permettent la séparation des flux « nucléaires » et « travaux », la séparation des zones HA et MAVL ainsi que la séparation des sous-zones MAVL. Ils contribuent à la ventilation des installations souterraines et pour la zone MAVL assurent la séparation des flux de retour d'air provenant des zones nucléaires des flux provenant des zones travaux.

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

3.3.5 La zone de stockage des colis MAVL

La zone de stockage des colis MAVL est constituée des galeries de liaisons principales et secondaires, de modules de stockage et de galeries de retour d'air (cf. Figure 3.3-10). Cette section n'aborde que les modules de stockage et la galerie de retour d'air.

Ces modules sont constitués de (cf. Figure 3.3-9) :

- une galerie d'accès à l'alvéole ;
- une tête de l'alvéole comprenant une zone d'accostage et une cellule de manutention des colis ;
- une partie utile de l'alvéole, recevant les colis de stockage ;
- une galerie d'extraction d'air « alvéole » connectée à la galerie de retour d'air.

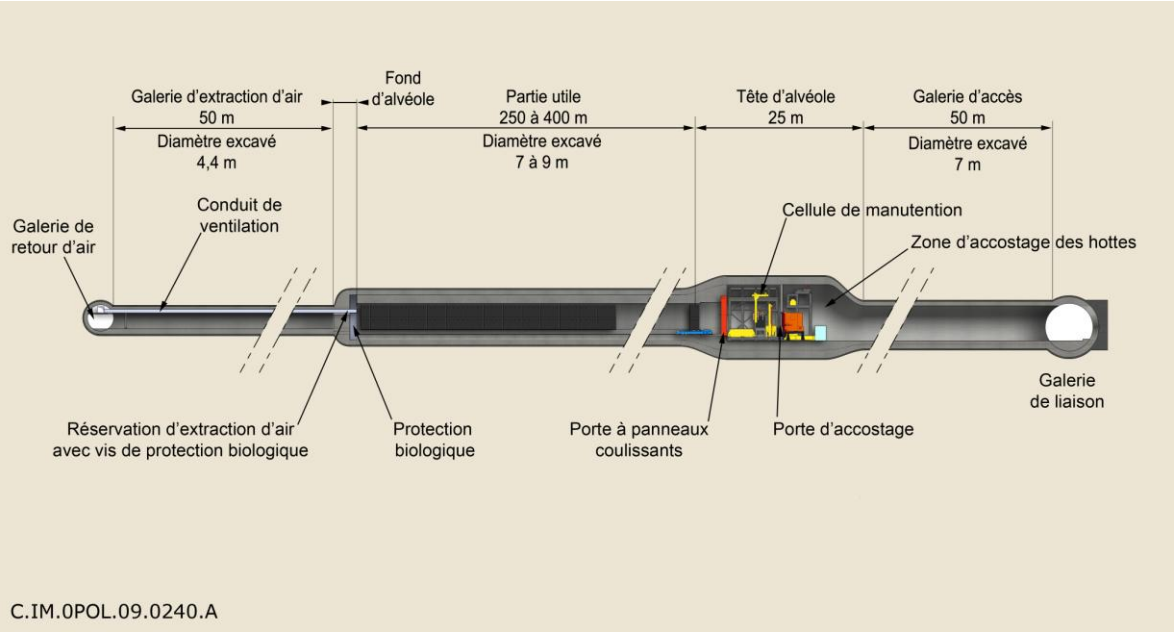


Figure 3.3-9 Module de stockage MAVL

Exigences de sûreté

La zone de stockage des colis MAVL participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ La galerie d'accès de l'alvéole, la tête de l'alvéole et la partie utile de l'alvéole contribuent indirectement à l'accomplissement de cette fonction par la maîtrise des risques susceptibles d'entraîner la dispersion de substances radioactives.
  - ✓ La cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole MAVL assure le confinement statique des gaz radioactifs en situation normale de fonctionnement.
  - ✓ La cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole assurent le confinement statique des substances radioactives relâchées par un colis de stockage pour toutes les situations accidentelles aboutissant à sa perte de confinement.
  - ✓ La galerie d'extraction d'air « alvéole » assure le passage des gaines de la ventilation qui réalise le confinement dynamique de l'alvéole.
- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ Les parois séparant la zone d'accostage et la cellule de manutention ainsi que celle séparant la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole doivent limiter les doses reçues par les travailleurs au niveau des postes de travail.
  - ✓ Le fond de l'alvéole qui sépare la galerie d'extraction d'air de la partie utile de l'alvéole doit limiter les doses reçues par les travailleurs au niveau du local de filtration éventuel.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ L'agencement et la configuration de la cellule de manutention et de la partie utile de l'alvéole MAVL doit permettre une circulation d'air assurant l'évacuation des gaz de radiolyse émis par les colis MAVL concernés.
  - ✓ La galerie d'extraction d'air « alvéole » assure le passage des gaines de la ventilation qui évacue les gaz de radiolyse des ouvrages de stockage.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ La forme et la géométrie de la partie utile de l'alvéole participent à la maîtrise de la sous-criticité en exploitation. Les jeux fonctionnels (entre colis et parois d'alvéole) prévus pour la manutention des colis sont pris en compte dans les études de criticité. Leur évolution au cours de la phase d'exploitation et de réversibilité ne doit pas modifier les conclusions de ces études.

- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ L'agencement et la configuration de la cellule de manutention et de la partie utile de l'alvéole MAVL doit permettre l'évacuation de la puissance thermique des colis de stockage MAVL exothermiques ; cette évacuation doit pouvoir s'effectuer sans ventilation, par convection / conduction dans l'air et conduction dans le revêtement et l'argilite ; la ventilation permet de fait d'abaisser les températures sans être requise pour la sûreté.
  - ✓ La galerie d'extraction d'air « alvéole » assure le passage des gaines de la ventilation qui contribue de fait à évacuer la puissance thermique des colis de déchets.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- La configuration et la conception de la zone de stockage des colis MAVL doivent limiter autant que possible les risques d'endommagement des colis de stockage et les risques pouvant affecter le fonctionnement de la ventilation ;
- La qualité de conception et de fabrication de la zone de stockage, et plus particulièrement de l'alvéole, doit garantir sur toute la durée de l'exploitation de l'installation y compris la réversibilité, un maintien de ses caractéristiques mécanique, chimique et géométrique assurant la protection des colis vis-à-vis des agressions, garantissant l'absence de risque de criticité et l'absence d'endommagement (physique ou chimique) des colis par la zone de stockage ;
- Dans le cadre d'une gestion réversible du stockage, la conception des alvéoles doit permettre d'assurer la récupérabilité des colis ;
- Les écrans de protection radiologiques doivent être dimensionnés pour minimiser l'exposition externe du personnel associée à la démarche ALARA et respecter les contraintes de radioprotection fixées par l'Andra (cf. chapitre 1).

Options de sûreté/conception

Les colis MAVL présentant des caractéristiques physico-chimiques différentes sont stockés dans des modules distincts. Ceux ne contenant pas de matières organiques sont dits de type 1, ceux en contenant, de type 2.

Les modules de types différents sont séparés par une garde d'argilite assurant, après fermeture, l'absence d'interaction chimique entre eux, la garde entre alvéoles de types différents étant prise identique à la garde verticale d'argilite, soit 60 mètres.

La Figure 3.3-10 illustre la possibilité d'organiser une zone de stockage en deux sous-zones.

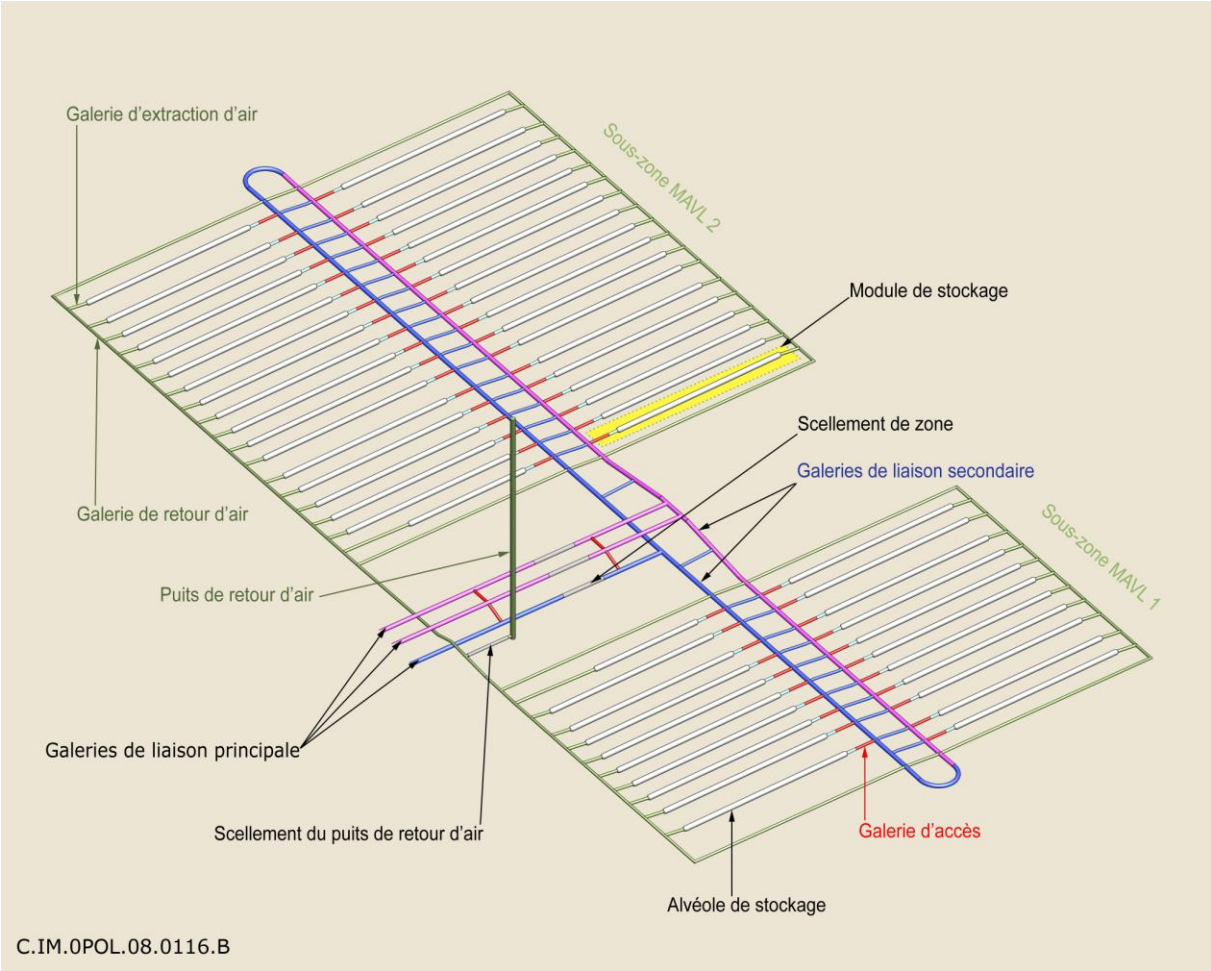


Figure 3.3-10 Organisation de la zone de stockage des déchets MAVL (scénario de base)

Dans la Figure 3.3-10, les modules de stockage sont disposés de part et d'autre du faisceau de liaison secondaire constitué d'une galerie de transfert de colis et d'une galerie de travaux permettant de gérer les risques liés à la co-activité.

Les modules de stockage MAVL retenus sont des tunnels horizontaux, orientés selon la contrainte horizontale majeure. Ces modules sont « passants », la ventilation permettant d'évacuer les gaz radioactifs ou explosifs émis par les colis en fonctionnement normal pendant toute la durée d'exploitation. Cette configuration améliore la sûreté au niveau du module de stockage en supprimant notamment les modes communs de défaillance de la ventilation et de défauts d'accès aux modules. Elle permet également de prévoir des dispositifs de surveillance en aval du module et, si nécessaire, des dispositions de type filtration de très haute efficacité placés au plus près des alvéoles de stockage.

Pour reprendre de façon plus précise la description des modules indiquée au début de cette section, ils sont constitués de (cf. Figure 3.3-9) :

- une *galerie d'accès* à l'alvéole, de diamètre minimisé (de l'ordre de 8 m), dans laquelle sera installé un scellement lors de la fermeture ;
- une *tête de l'alvéole* équipée d'un local d'accostage de la hotte et d'une cellule de manutention des colis ;
- une *partie utile* de l'alvéole dans laquelle les colis sont stockés par un engin de manutention ; sa longueur utile maximale est d'environ 400 m et son diamètre excavé est compris entre 7 et 9 m ;
- une *galerie d'extraction d'air « alvéole »*, de diamètre réduit, dans laquelle sera également installé un scellement lors de la fermeture.

Il est important de noter que la pente dans les galeries d'accès, la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole de stockage est nulle afin de s'affranchir de toute situation de dérive au cours des opérations de transfert, d'accostage, de préparation et de mise en place des colis de stockage.

Une galerie dite « *de retour d'air* » périphérique à chaque sous-zone recueille l'air issu des alvéoles dans un compartiment dédié qui est connecté à un puits de retour d'air consacré à la zone MAVL, situé entre les deux sous-zones. Les flux d'air issus des travaux sont également recueillis dans la galerie de retour d'air (second compartiment) et évacués via le puits de retour d'air de la zone MAVL.

Le scellement de la zone MAVL est réalisé dans des tronçons de galeries de liaison principale orientés parallèlement à la contrainte horizontale majeure et les opérations de sa mise en place doivent satisfaire les exigences de sûreté après fermeture. La disposition des scellements sera fixée au regard des exigences de sûreté après fermeture et précisée au moment de la DAC puis réévaluée au moment de chaque réexamen de sûreté. Ces scellements assurent notamment le fractionnement au niveau des sous-zones. Leur réalisation nécessite pendant l'exploitation une attention particulière liée aux gaz explosifs relâchés par les colis qui ne seraient plus évacués par les systèmes de ventilation au cours des opérations de fermeture.

L'emprise de la zone de stockage des déchets MAVL correspond à un rectangle de 2,5 km x 1,2 km, soit environ 3 km^2 pour le *scénario de base* (2,6 km x 1,2 km, soit environ 3,2 km^2 pour le *scénario de dimensionnement*).

3.3.6 La zone de stockage des colis HA de déchets vitrifiés fortement exothermiques

La zone de stockage HA peut être organisée en sous-zones permettant de séparer les colis les moins exothermiques (C0 et CU3) des autres colis, chacune étant desservie par deux galeries de liaison secondaire. Chaque sous-zone de stockage est composée de modules d'exploitation constitués de trois galeries d'accès, de rameaux perpendiculaires, dits « recoupes » et des alvéoles de stockage. L'alvéole de stockage est constituée d'une tête d'alvéole et d'une partie utile recevant les colis de stockage.

Exigences de sûreté

La zone de stockage des colis HA participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ La galerie d'accès et l'alvéole contribuent indirectement à l'accomplissement de cette fonction par la maîtrise des risques susceptibles d'entraîner la dispersion de substances radioactives.
  - ✓ Les alvéoles doivent s'opposer à l'arrivée d'eau provenant de la roche hôte.
- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ La tête de l'alvéole doit limiter les doses reçues par les travailleurs au niveau de la zone d'accostage des hottes dans la galerie d'accès.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ Les colis HA n'émettent pas de gaz de radiolyse.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ La forme et la géométrie de la partie utile de l'alvéole participent à la maîtrise de la sous-criticité en exploitation. Les jeux fonctionnels (entre colis et chemisage d'alvéole) prévus pour la manutention des colis sont pris en compte dans les études de criticité. Leur évolution au cours de la phase d'exploitation et de réversibilité ne doit pas modifier les conclusions de ces études.
- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ L'alvéole de stockage HA participe à cette fonction. Des exigences de conception sur la distance entre alvéoles et des contraintes d'exploitation sont mises en œuvre pour limiter la densité de puissance thermique dans les alvéoles et au niveau de la zone pour que la température de la roche hôte ne dépasse pas la limite admissible retenue.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- La configuration et la conception de la zone de stockage des colis HA doivent limiter autant que possible les risques d'endommagement des colis de stockage ;
- La qualité de conception et de fabrication de la zone de stockage, et plus particulièrement de l'alvéole, doit garantir sur la période de l'exploitation de l'installation, y compris la réversibilité, un maintien de ses caractéristiques mécanique, chimique et géométrique assurant la protection des colis vis-à-vis des agressions, garantissant l'absence de risque de criticité et l'absence d'endommagement (physique ou chimique) des colis par la zone de stockage ;
- Dans le cadre d'une gestion réversible du stockage, la conception des alvéoles doit permettre d'assurer la récupérabilité des colis ;
- Les écrans de protection radiologiques doivent être dimensionnés pour resp ecter les contraintes de radioprotection fixées par l'Andra et la limitation de l'exposition externe du personnel associée à la démarche ALARA.

Options de sûreté/conception

Le faisceau de liaison principale, reliant la zone centrale à la zone de stockage des déchets HA, est composé de trois galeries de liaison (une galerie de transfert de colis et deux galeries de travaux).

Chaque sous-zone de stockage HA (cf. Figure 3.3-11) est desservie par deux galeries de liaison secondaire (une galerie de transfert de colis et une galerie de travaux). Cette disposition facilite l'organisation de leur construction, de leur exploitation et de leur fermeture, et est favorable à un développement progressif. Elle permet de gérer la co-activité dans les installations souterraines.

Chaque sous-zone de stockage est actuellement composée d'une dizaine de modules d'exploitation, situés de part et d'autre du faisceau secondaire (5 modules d'exploitation de chaque côté).

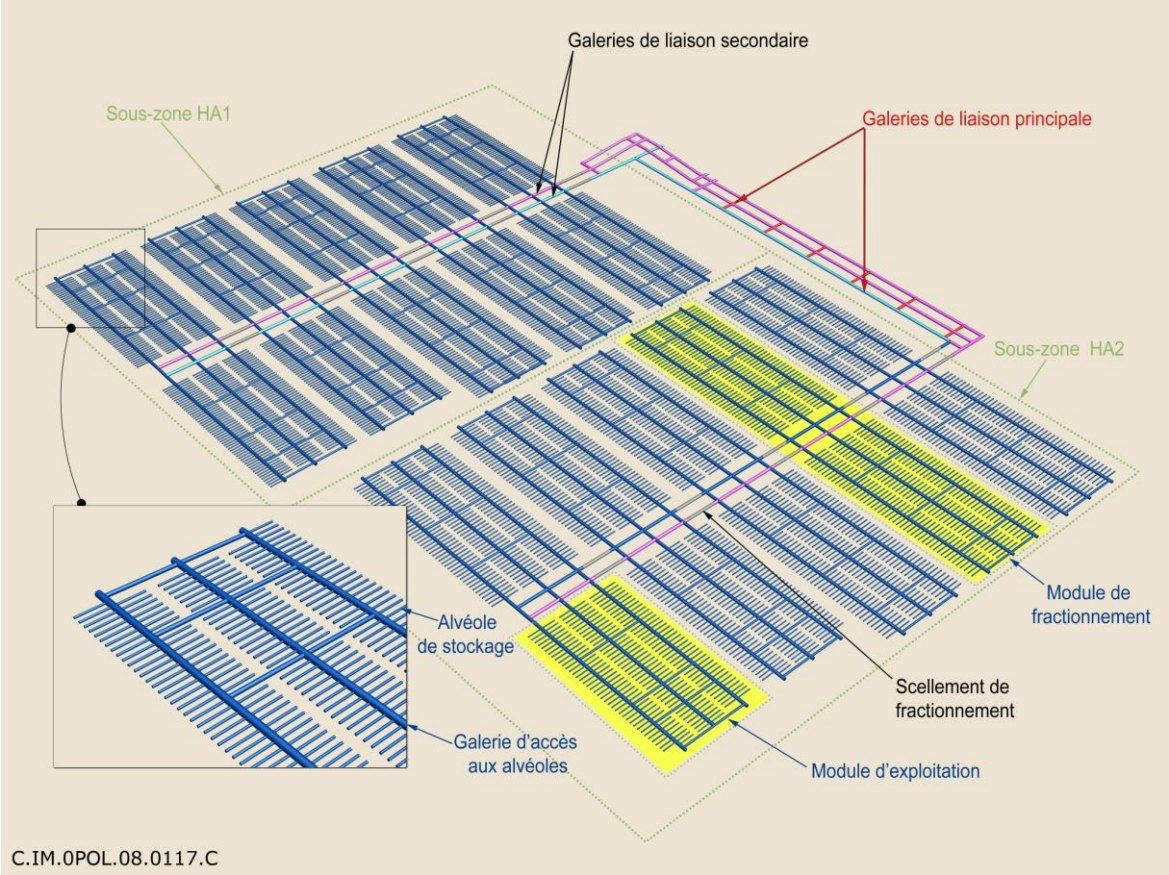


Figure 3.3-11 Organisation de la zone de stockage des déchets HA (scénario de base)

Tout en respectant les exigences en terme de niveau d'implantation (< 600 m) et d'épaisseur de garde (> 60 m) nécessaires pour respecter les exigences après fermeture, afin de limiter l'occurrence d'une dérive des véhicules de transfert et les conséquences associées, la pente des galeries de liaison principale et secondaire est faible, inférieure à 3%, tandis que celle des galeries d'accès est nulle.

Un module d'exploitation (cf. Figure 3.3-14) est constitué de trois galeries d'accès aux alvéoles, de rameaux perpendiculaires, dits « recoupes », et d'environ 300 alvéoles de stockage implantées perpendiculairement aux galeries et orientées selon la contrainte horizontale majeure. La longueur des galeries d'accès est d'environ 700 m ; la longueur des alvéoles horizontales est de 40 m. Cette disposition en triplets de galeries permet d'assurer une grande sécurité de fonctionnement de la ventilation, même en cas d'incendie. Pour l'inventaire du scénario de dimensionnement, et selon la durée d'entreposage préalable des déchets, seuls le nombre d'alvéoles par module, et par conséquent la longueur des galeries d'accès, varient (environ 400 alvéoles par module d'exploitation et une longueur de galerie d'accès jusqu'à 1 000 m).

La conception et le dimensionnement des modules d'exploitation sont conditionnés par la puissance thermique des colis de stockage.

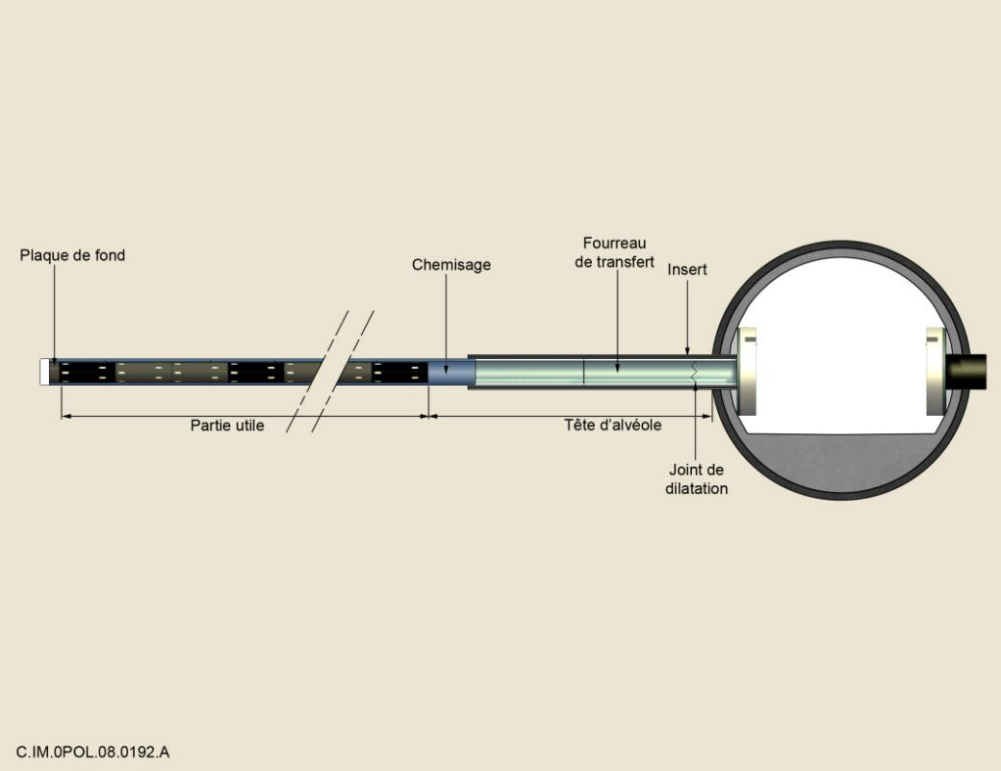


Figure 3.3-12 Alvéole HA en cours de remplissage

L'alvéole de déchets HA est un tunnel d'environ 40 mètres de longueur et de 0,7 m de diamètre. Elle comprend une partie utile sur environ 30 m de longueur, dans laquelle sont stockés les colis, et une tête d'alvéole d'environ 10 mètres (cf. Figure 3.3-12).

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

La tête d'alvéole est séparée de la partie utile par un bouchon métallique de radioprotection. Elle est dotée d'un chemisage métallique[36] (« insert »).

La partie utile de l'alvéole peut accueillir environ 20 colis moyennement exothermiques (colis C0) ou de 6 à 8 colis fortement exothermiques. Si la puissance thermique des déchets à la mise en stockage impose d'espacer les colis fortement exothermiques dans les alvéoles, l'espacement est assuré par des intercalaires pour homogénéiser le flux thermique.

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

Lors de la mise en exploitation de l'alvéole de stockage, un fourreau, doté d'un joint de dilatation thermique, est mis en place dans l'insert pour établir une continuité de la piste de glissement des colis de stockage avec le chemisage.

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

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

En fin de remplissage de l'alvéole (cf. Figure 3.3-13), un bouchon métallique de fermeture est mis en place dans le chemisage à une dizaine de mètres de la galerie. Ce bouchon, qui comprend un écran de protection radiologique, permet le retrait de l'operculaire et du fourreau d'exploitation. Le bouchon est muni de points de connexion pour installer des lignes de prélèvement et de contrôle de l'atmosphère occluse dans la cellule de stockage, notamment pour vérifier la teneur en gaz radioactifs (cas d'un défaut de colis) et en hydrogène (phénomène de radiolyse issu des rayonnements ionisants des colis). Ces lignes sont connectées à une console de mesures installée sur la plaque de fermeture de l'alvéole.

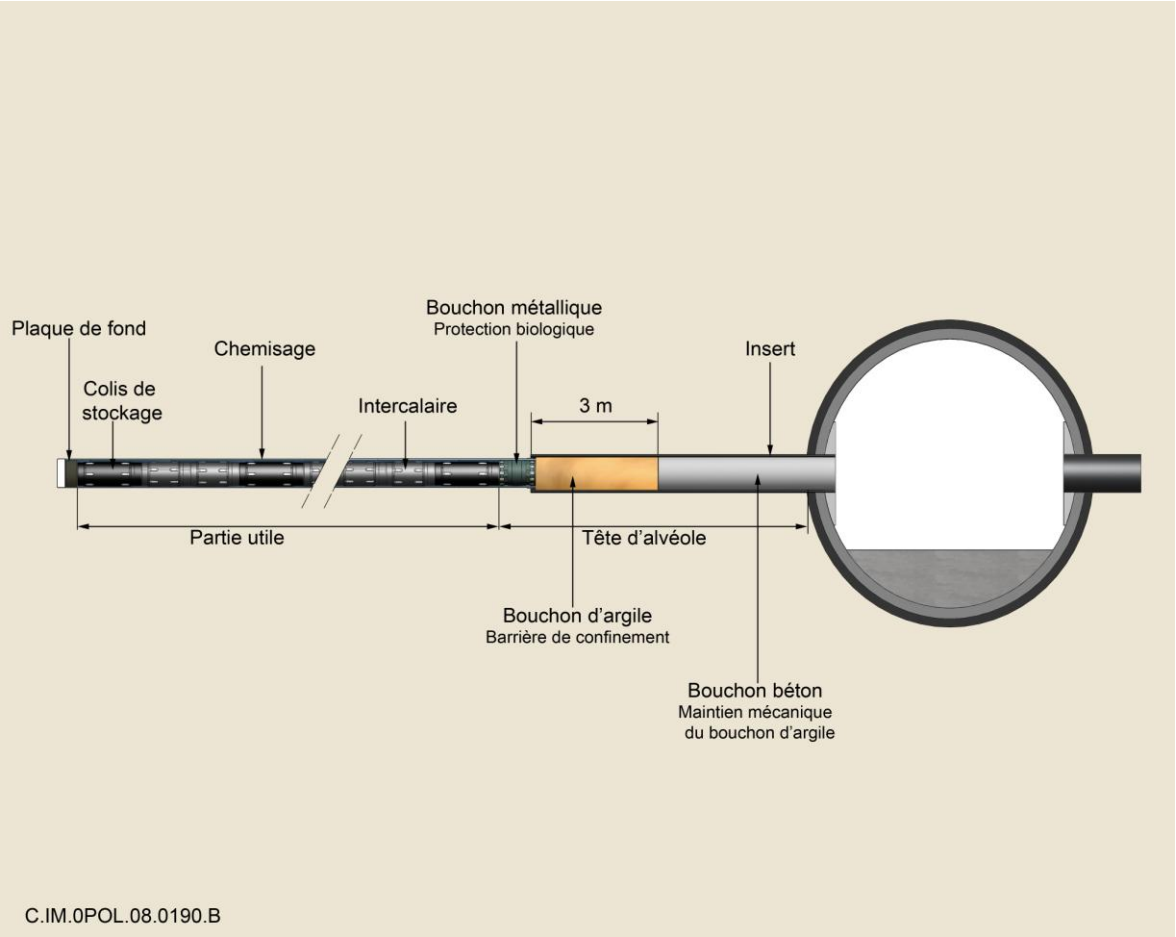


Figure 3.3-13 Alvéole HA fermée

Lors de la fermeture de la zone, outre les bouchons d'argile placés dans la tête d'alvéole, des scellements, permettant de respecter les exigences après fermeture, sont mis en place dans les deux galeries de liaison secondaires, parallèles à la contrainte horizontale majeure, entre chaque paire de modules d'exploitation disposés face à face (cf. Figure 3.3-14).

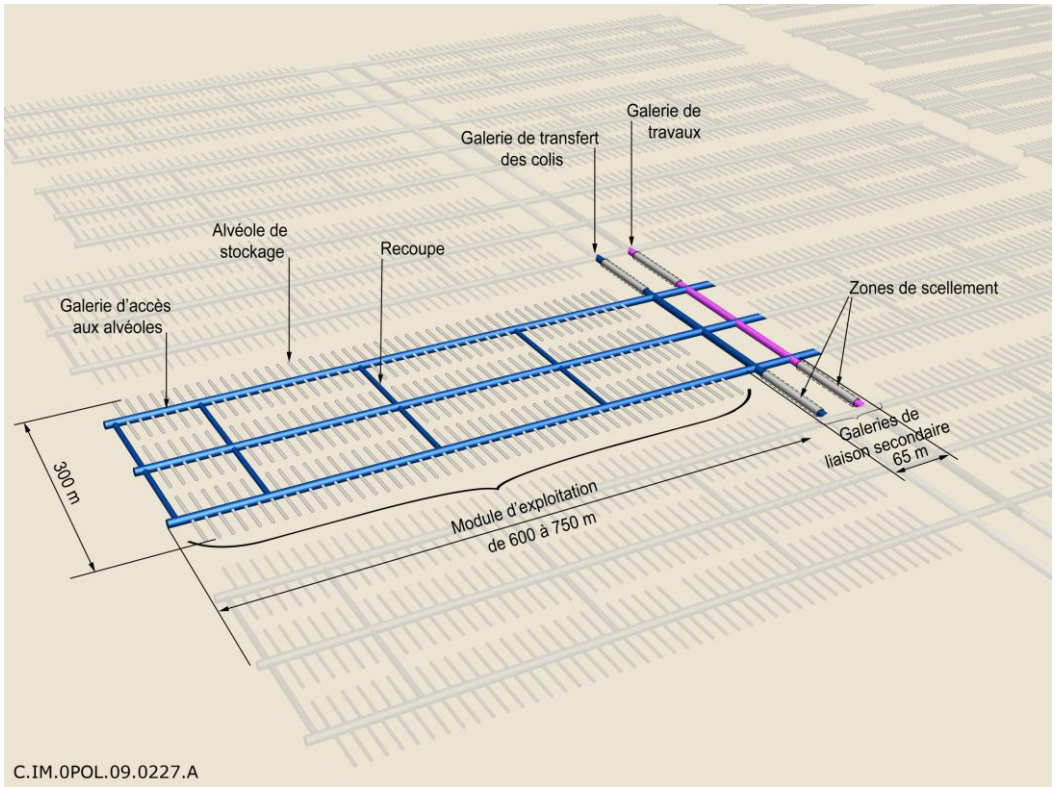


Figure 3.3-14 Agencement d'un module d'exploitation HA

Pour une durée d'entreposage préalable des déchets HA fortement exothermiques, de 60 à 70 ans, la zone de stockage de déchets HA s'étendrait sur une surface rectangulaire de 3 km x 2 km, soit environ 6 km² pour le scénario de base (4 km x 2 km, soit environ 8 km² pour le scénario de dimensionnement).

3.3.7 Modules de stockage des colis HA de déchets vitrifiés moyennement exothermiques (C0) et de combustibles usés CU3

Les exigences de sûreté requises pour les modules de stockage des colis HA CO et CU3 sont identiques à celles requises pour les modules de stockage des colis HA de déchets vitrifiés fortement exothermiques.

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

L'organisation de ces modules (cf. Figure 3.3-15) est similaire à celle des modules d'exploitation de déchets HA. Les modules sont desservis par deux galeries de liaison (une galerie de transfert de colis et une galerie de travaux). Lors de la fermeture, des scellements, orientés selon la contrainte horizontale majeure sont mis en place dans ces deux galeries.

Les exigences associées à la pente des galeries dédiée au transfert des colis sont similaires à celles retenues pour les zones MAVL et HA.

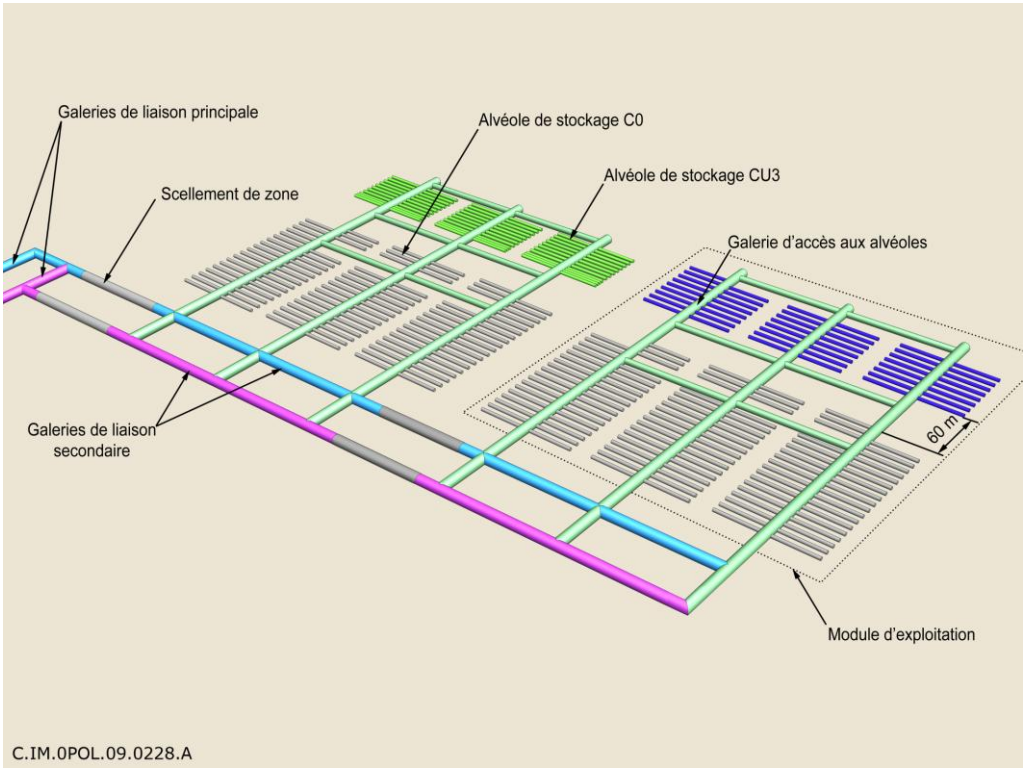


Figure 3.3-15 Organisation de la zone de stockage des déchets C0 et des combustibles usés CU3 (scénario de base)

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

3.3.8 L'architecture générale

Exigences de sûreté

L'architecture générale doit garantir l'atteinte des objectifs de sûreté relatifs au fonctionnement général des installations au travers de l'accomplissement des fonctions de sureté assurées par les composants des installations. Elle participe aux fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ L'architecture générale constituée de modules de stockage distincts et séparés simplifie l'identification des risques propres aux caractéristiques des déchets de chacun des modules et la définition de dispositions pour assurer le confinement des colis.
  - ✓ L'architecture générale assure la protection des colis de stockage contre les agressions d'origine interne et externe pouvant porter atteinte à leur confinement, notamment par séparation géographique.
  - ✓ L'architecture générale permet une exploitation et une flexibilité d'exploitation garantissant le maintien du confinement des substances radioactives que ce soit en situation normale ou accidentelle.
- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ L'architecture générale permet de mettre en œuvre les principes et les dispositions pour limiter l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ L'architecture générale, de par la séparation des différents types de déchets, assure une sectorisation du risque lié au gaz de radiolyse et permet la mise en œuvre de dispositions adaptées à la prise en compte de ce risque (cf. la ventilation) pour les zones concernées.

- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ L'architecture générale, de par la séparation des différents types de déchets, assure une sectorisation du risque lié à la criticité, et permet de limiter les analyses et de mettre en œuvre des dispositions adaptées dans les zones concernées de l'installation.
- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ L'architecture générale, de par la séparation des différents types de déchets, assure une sectorisation du risque lié à la puissance thermique des déchets et permet la mise en œuvre de dispositions adaptées à la prise en compte de ce risque (cf. la ventilation dans les galeries de liaison et d'accès) pour les zones concernées.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- L'architecture générale de l'installation doit permettre de minimiser l'impact des risques d'origine interne ou externe sur les composants assurant les fonctions de sûreté ;
- L'architecture générale de l'installation doit vérifier qu'en situation de fonctionnement normal et accidentel, l'installation respecte dans son ensemble les objectifs de sûreté, de sécurité et environnementaux.

<u>Options de sûreté/conception</u>

Un exemple d'organisation générale possible de l'ensemble du stockage est illustrée par la Figure 3.3-16 et la Figure 3.3-17. L'orientation géographique des installations est largement tributaire du choix d'orienter l'ensemble des alvéoles de stockage et des scellements selon la contrainte horizontale majeure.

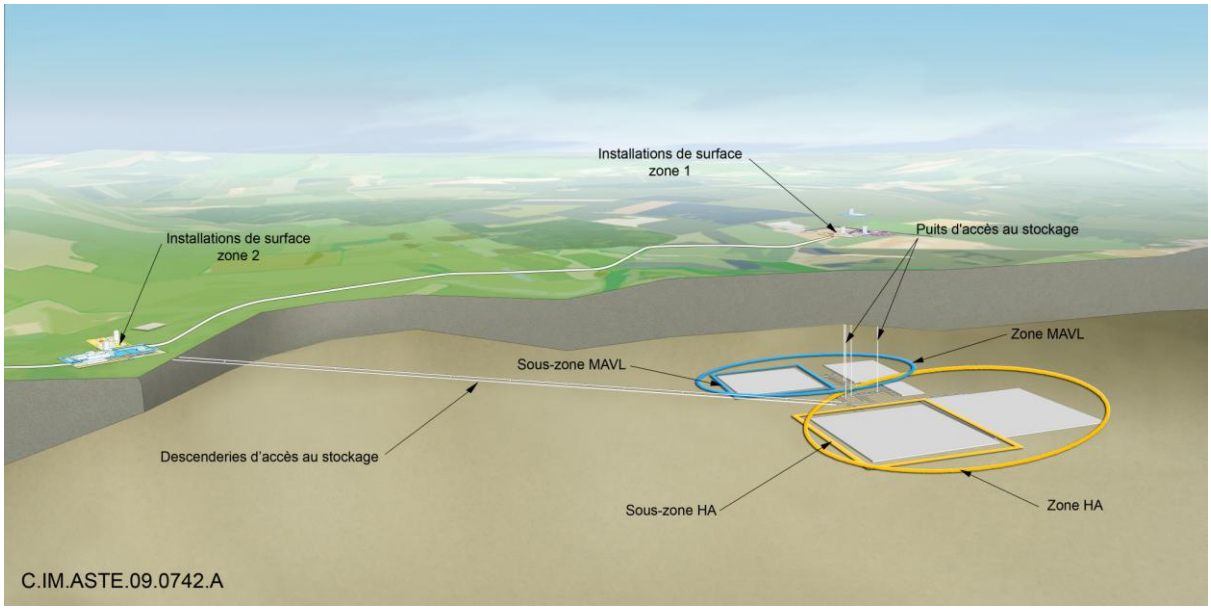


Figure 3.3-16 Vue 3D du stockage (scénario de base)

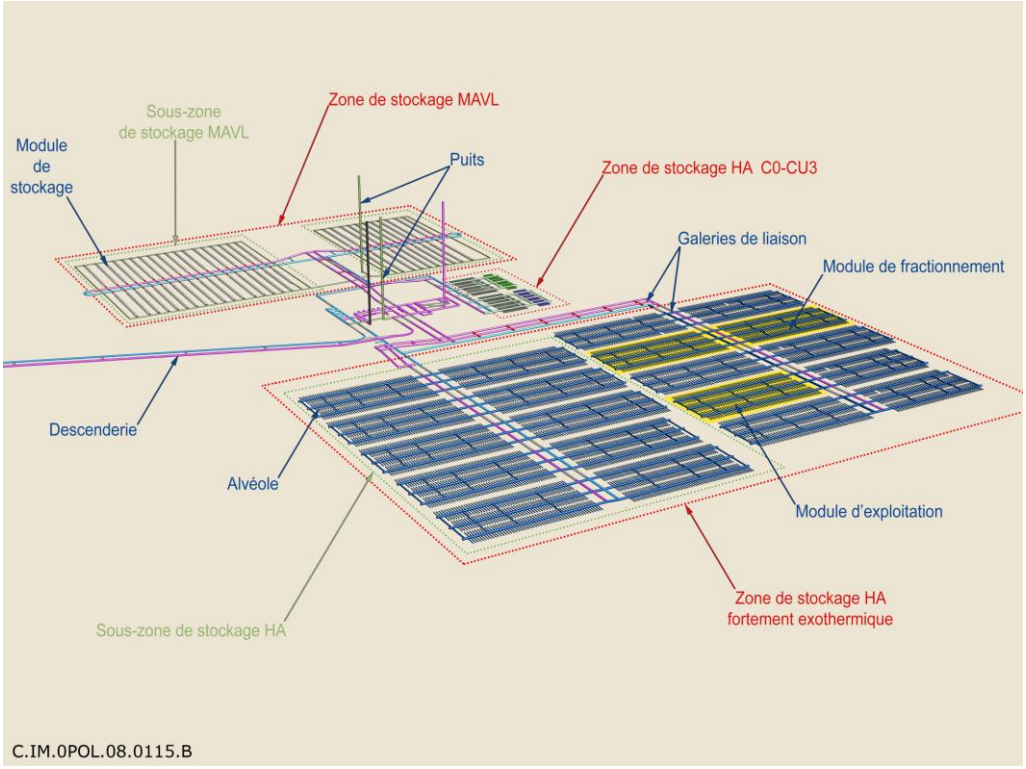


Figure 3.3-17 Vue en plan du stockage (scénario de base)

L'architecture présentée illustre trois zones de stockage disposées autour de la zone centrale :

- la zone de stockage des déchets MAVL est composée de deux sous-zones, celles-ci pouvant être exploitées simultanément ;
- la zone de stockage des déchets HA se développe à l'opposé de la zone MAVL afin d'éviter toute interaction thermique ; elle est composée de deux sous-zones qui sont supposées être exploitées l'une après l'autre ;
- la zone de stockage des déchets C0 et des combustibles usés CU3, constituée de deux modules d'exploitation, est située entre les zones MAVL et HA.

Chacune de ces zones possède ses propres galeries de liaison afin de limiter les interférences de travaux et d'exploitation. Elles peuvent ainsi être construites, exploitées et fermées indépendamment les unes des autres.

Pendant l'exploitation, on aura à la fois des alvéoles remplies et fermées, des alvéoles remplies en cours de fermeture, des alvéoles en cours de remplissage et éventuellement des alvéoles en cours de retrait.

Globalement, l'architecture présentée s'inscrit dans un rectangle d'environ 3 km par 4,4 km, soit une emprise horizontale de 13 km^2 dans l'hypothèse d'un entreposage préalable des déchets HA fortement exothermiques limité à 60-70 ans. Pour le scénario de dimensionnement, cette emprise est augmentée à 18,5 km^2 (4,2 km x 4,4 km).

3.3.9 La ventilation

Exigences de sûreté

La ventilation participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion :
  - ✓ La ventilation assure le confinement dynamique des gaz radioactifs émis par les colis de stockage en situation normale de fonctionnement, dans les installations souterraines, notamment dans les alvéoles de stockage MAVL.

- ✓ La ventilation assure les fonctions de refroidissement et de conditionnement requises pour le bon fonctionnement des dispositions mises en œuvre au titre du confinement des matières radioactives[37]. Ces fonctions doivent aussi être assurées dans les zones de l'installation où :
  - du personnel doit intervenir ou séjourner en maintenant une concentration en oxygène, un taux d'humidité et une température compatibles avec les critères requis pour ce poste de travail ;
  - des équipements participant à la sécurité et la sûreté des installations sont installés en maintenant notamment des températures compatibles avec leur bon fonctionnement.
- ✓ La ventilation assure le confinement dynamique des substances radioactives relâchées par un colis de stockage en situation accidentelle (perte de confinement) dans les zones pour lesquelles le confinement statique ne serait pas suffisant.
- ✓ Les gaines et galeries de ventilation assurent le confinement statique des substances radioactives extraites des zones pouvant être contaminées en situation accidentelle de fonctionnement.
- ✓ La ventilation doit éviter la propagation des effets des agressions d'origine interne ou externe qui peuvent porter atteintes au confinement des substances radioactives.

- Protéger les personnes contre l'irradiation :
  - ✓ Les composants de la ventilation, notamment les gaines et galeries de ventilation transportant des gaz et substances radioactives et les filtres, ne doivent pas générer des risques non maîtrisés d'irradiation des personnes.
- Evacuer les gaz de radiolyse :
  - ✓ La ventilation assure l'évacuation des gaz de radiolyse émis par les colis de stockage en situation normale dans les ouvrages de liaison surface/fond, les infrastructures de liaison et la zone de stockage MAVL.
- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :
  - ✓ Les composants de la ventilation, notamment les gaines et galeries de ventilation et les filtres, ne doivent pas être le lieu d'accumulation de matières fissiles pouvant générer des risques de criticité.
- Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :
  - ✓ La ventilation des galeries et des alvéoles MAVL contribue à l'évacuation de la puissance thermique des colis de stockage placés dans les alvéoles sans qu'elle soit requise pour cette fonction ; le respect des critères thermiques doit être assuré par conception des alvéoles et modules, via l'ajustement des densités de stockage aux capacités de dissipation de la chaleur dans l'argilite.
  - ✓ Concernant les colis MAVL, l'évacuation de la puissance thermique des colis vise à garantir les caractéristiques du colis et de l'alvéole ainsi que la tenue des équipements présents dans l'alvéole et à proximité (cellule de manutention, local filtration).
  - ✓ Concernant les colis HA, elle vise à garantir le bon fonctionnement des équipements (capteurs, matériels électriques et électroniques…) implantés dans les galeries de liaison et d'accès aux alvéoles.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- Le confinement dynamique implique la mise en œuvre de dispositions pour assainir, épurer et surveiller l'air des zones devant être confinées. Les rejets de gaz et substances radioactives vers l'environnement doivent être les plus faibles possibles et doivent être comptabilisés ;
- Les systèmes de ventilation doivent être conçus pour éviter, en permanence, la dissémination des gaz radioactifs et des substances radioactives dans l'installation (limitation des fuites) ;
- La redondance, la diversité et la fiabilité des composants des systèmes de ventilation doivent être fixées en fonction des risques de dissémination de substances radioactives, qu'ils résultent de défaillance directe ou indirecte de ces composants ;
- Le dimensionnement au séisme des systèmes de ventilation nucléaire ou importants pour la sûreté de l'installation (en regard de la conséquence de leur défaillance en cas de séisme) est requis ;

[37] La ventilation maintient une hygrométrie basse favorable à la durabilité des bétons permettant la prédictibilité de leur état et de leur évolution. Elle contribue ainsi au maintien du confinement statique assuré par le colis de stockage des colis MAVL.

- La ventilation doit assurer la sectorisation des effets des agressions d'origine interne ou externe et principalement l'incendie. Toutefois, cette sectorisation ne doit pas être réalisée au détriment de la fonction de confinement requise en situation normale ou accidentelle ;
- Les objectifs de radioprotection et la limitation de l'exposition externe du personnel associée à la démarche ALARA doivent être respectés par la définition et le dimensionnement, si nécessaire, d'écrans de protection radiologique permettant de réduire les doses provenant des composants de la ventilation (gaines, galeries et filtres) ;
- La ventilation doit évacuer les gaz de radiolyse et être conçue de sorte que le risque d'explosion soit exclu :
  - ✓ Dans les zones de relâchement des gaz (hottes de transfert, galeries et alvéoles) ;
  - ✓ Dans les composants des systèmes de ventilation ;
  - ✓ Dans les parties de l'installation où sont installés les composants des systèmes de ventilation.

Options de sûreté/conception

L'architecture du stockage présentée à la Figure 3.3-18 inclut deux puits de retour d'air, l'un dédié spécifiquement à la zone de déchets MAVL, le second assurant le retour d'air pour le reste des installations. Ils permettent d'évacuer les débits d'air vicié importants mis en jeu (plusieurs centaines de m^3/s) et l'évacuation des fumées en cas d'incendie. Ils ne sont pas utilisés pour le transfert de personnel.

Le puits de retour d'air situé dans la zone centrale a pour fonctions d'assurer le retour d'air général de l'ensemble du stockage (travaux et exploitation), hors zone de stockage MAVL, l'évacuation des fumées en cas d'incendie, et le retour d'air en provenance de la descenderie de transfert des colis[38].

Le second puits de retour d'air est situé dans la zone MAVL, entre les deux sous-zones et à proximité de la zone centrale. Ce choix résulte de la nécessité d'assurer un circuit de ventilation spécifique des alvéoles de déchets MAVL durant leur phase d'exploitation pour l'évacuation des gaz émis par les colis de déchets.

La mise en place d'un puits de retour d'air dédié permet de dissocier les flux de retour d'air MAVL des autres flux de retour d'air du stockage qui empruntent le puits de retour d'air général, et de simplifier les aménagements de la zone centrale (absence de circuits de retour d'air des alvéoles MAVL dans les galeries de liaison secondaires et principales).

L'air issu des alvéoles MAVL chemine dans un compartiment dédié d'une galerie de retour d'air, connectée à chaque fond d'alvéole, qui enceint chaque sous-zone. L'air issu des travaux de la zone MAVL chemine également via un second compartiment de la galerie de retour d'air jusqu'au puits de retour d'air de la zone MAVL.

L'air neuf nécessaire au fond est essentiellement acheminé par le puits de personnel ; un complément d'air est apporté par le puits de travaux et par le tube de sécurité/service de la descenderie. Le tube de la descenderie affectée au transfert des colis est isolé par des sas à ses deux extrémités. L'air issu de cette descenderie ne participe pas à la ventilation générale du stockage.

[38] Un autre principe de ventilation de la descenderie double tube consisterait à utiliser le tube de service en tant que gaine d'amenée d'air neuf pour le tube de transfert de colis, alors en sortie d'air.

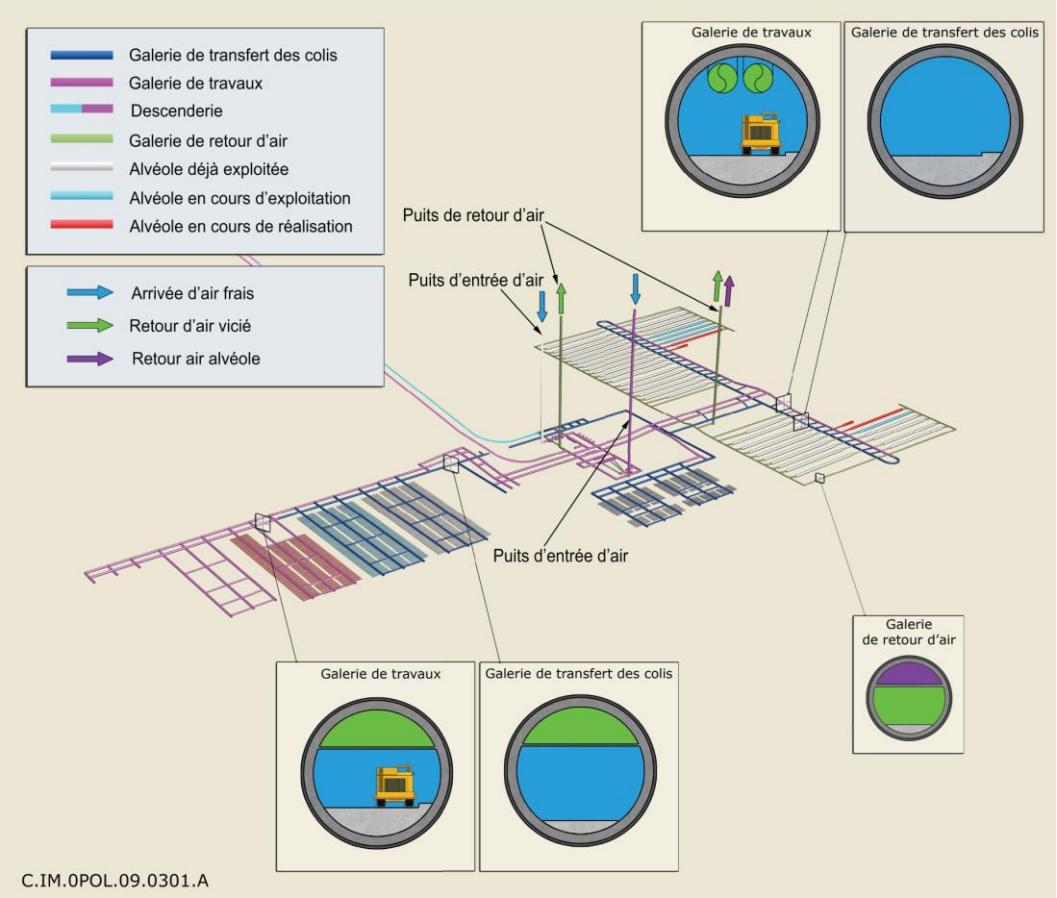


Figure 3.3-18 La ventilation de l'architecture du stockage

Le système de ventilation décrit précédemment est conçu en considérant le fonctionnement normal et accidentel (notamment l'incendie) des installations sur la base de principes généraux décrits ci-après :

- une séparation des circuits de ventilation de la zone « travaux » et de la zone en « exploitation nucléaire » ;
- une arrivée d'air dans des galeries en pleine section, sans conduit dédié ;
- pour la zone MAVL, un retour d'air dans une galerie dédiée (avec compartiments séparés travaux / nucléaire) jusqu'au puits de retour d'air spécifique à la zone ;
- pour la zone HA, un retour d'air en gaines par les galeries jusqu'au puits de retour d'air principal.

En cas d'incendie, cette logique est conservée : la ventilation n'est pas mobilisée par des opérations d'inversion de la ventilation, mais seulement par la possibilité d'augmenter si nécessaire le flux d'air au niveau du lieu de l'incendie de manière à s'assurer du contrôle du sens d'évacuation des fumées.

Le désenfumage est conçu pour pousser les fumées vers des trappes d'extraction implantées sur le circuit de retour d'air :

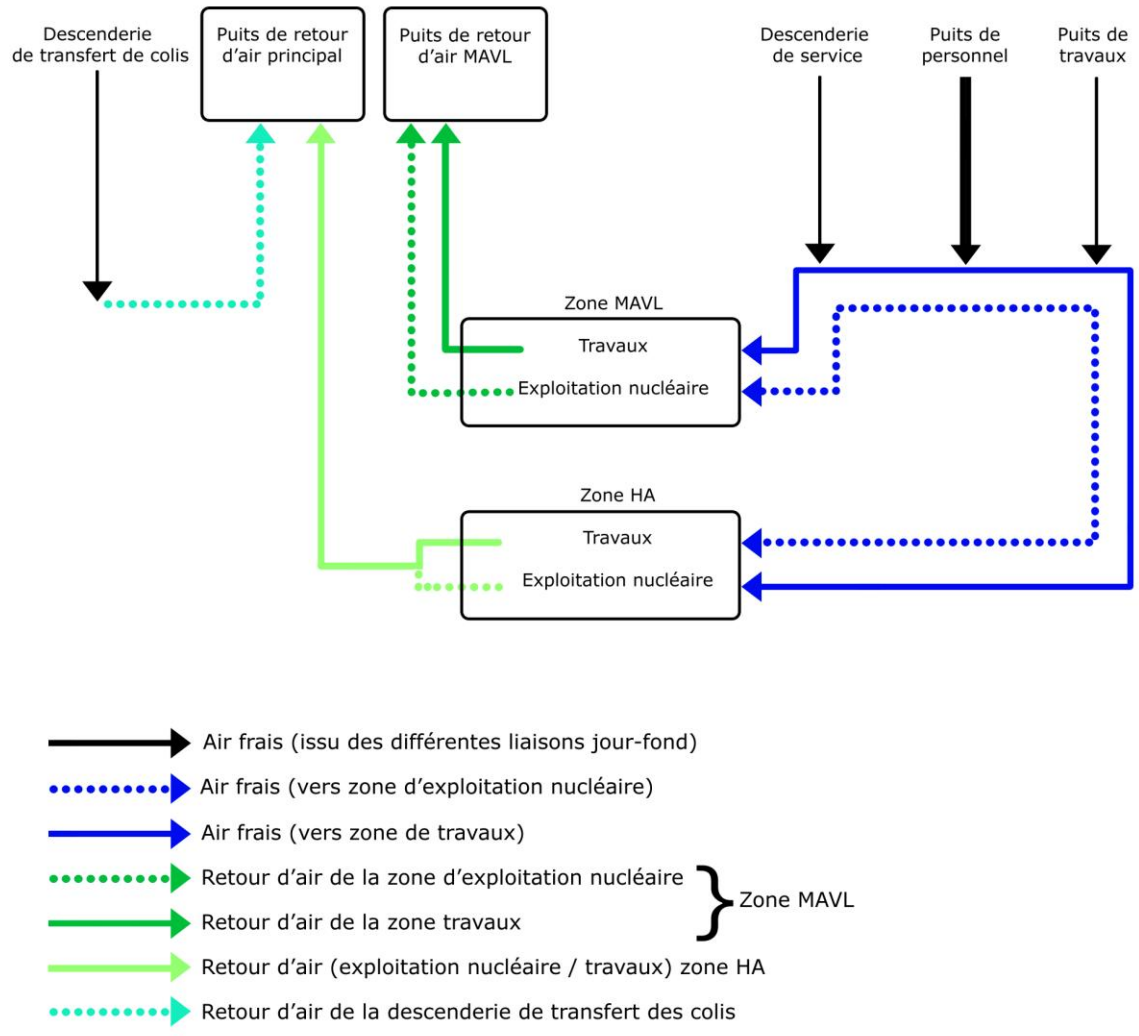
- les fumées liées à un incendie en zone « travaux » sont évacuées par les gaines (ou compartiments de galerie) dédiées du retour d'air « travaux » ;
- les fumées liées à un incendie en zone « nucléaire » sont évacuées par les gaines (ou compartiments de galerie) dédiées du retour d'air « nucléaire », et séparées physiquement des gaines de retour « travaux » ;
- un incendie en alvéole MAVL est un cas particulier pour lequel un arrêt de ventilation est prévu avec fermeture des clapets coupe-feu (cf. section 3.4.3.1).

L'évacuation du personnel est prévue par conception par la mise en place de 2 voire 3 faisceaux de galeries parallèles reliées par des recoupes dont l'interdistance est définie pour permettre au personnel de rejoindre une galerie hors fumées.

La stratégie de pilotage de la ventilation en situation d'incendie énoncée ci-avant est donc différente selon les zones concernées. Elle repose sur la présence de sas et barrages de ventilation ainsi que sur l'augmentation du débit d'extraction pour limiter les risques de propagation et faciliter le désenfumage dans les descenderies et galeries. Au sein de l'alvéole MAVL, elle consiste à confiner l'incendie dans l'alvéole en arrêtant la ventilation et actionnant les clapets coupe-feu.

Une attention particulière est portée sur la séparation physique des zones en exploitation nucléaire des zones en construction. Les systèmes de ventilation de chaque zone sont différents et séparés physiquement, excepté la zone HA qui est séparée jusqu'au bas du puits de retour d'air.

La Figure 3.3-19 illustre les réseaux de ventilation des installations du fond.



C.IM.ASTE.09.0732.C

Figure 3.3-19 Schéma de ventilation

Le schéma de ventilation intègre par ailleurs les solutions techniques présentées en 2009 et ayant évolué depuis 2005. Ainsi, le choix d'alvéoles MAVL « passantes » présente l'intérêt d'un circuit aéraulique plus simple et plus robuste (par rapport à la solution d'une gaine de retour d'air noyée dans le béton de l'alvéole qui était envisagé dans le Dossier 2005), et donne également la possibilité de l'implantation éventuelle d'unités de filtration au plus près de l'alvéole, dans le cas où le besoin en serait démontré.

De même, le fait d'avoir un circuit de ventilation dédié à la descenderie de transfert des colis permet, le cas échéant, de positionner une unité de filtration sur un flux d'air qui resterait limité.

3.3.10 Les systèmes de transfert des colis par hotte depuis la surface jusqu'au niveau du stockage

Exigences de sûreté

Les systèmes de transferts des colis par hotte depuis la surface jusqu'au niveau du stockage assurent une fonction opérationnelle relative à l'activité du stockage permettant entre autres la gestion des flux d'arrivée des colis. Ils ne participent pas directement aux fonctions de sûreté mais ils contribuent indirectement à leur accomplissement par la maîtrise des risques de perte de confinement des colis de stockage et des risques d'exposition aux rayonnements ionisants en situation normale ou accidentelle de fonctionnement.

Options de sûreté/conception

La conception des systèmes de transfert depuis la surface jusqu'au niveau du stockage a privilégié :

- Une minimisation des risques d'incendie par la limitation autant que faire se peut de leur charge calorifique (choix d'une alimentation électrique) et des sources d'ignition, la détection rapide d'un départ de feu sur les véhicules et engins à laquelle est associée une extinction automatique embarquée ;
- Une minimisation des risques de dérive et de collision par la présence de systèmes de guidage mécanique, par la limitation de la vitesse maximale de fonctionnement, par la présence de systèmes de freinage redondants et indépendants et par la présence d'un seul véhicule de transfert dans la descenderie ;
- La limitation de l'exposition externe du personnel par le choix d'un transfert des colis en hotte de radioprotection ; de plus, le pilotage automatique se ferait à distance depuis une salle de commande ou à défaut depuis une cabine de pilotage blindée ;
- Des systèmes d'exploitation simples pour une manœuvre facilitée et aisée des véhicules.

Ainsi, deux solutions sont proposées et prennent en compte l'hypothèse d'une descenderie déroulée pour le transfert des hottes. Le transfert par puits n'est pas repris ici dans la mesure où sa description et les études disponibles sont semblables à celles du Dossier 2005. De plus, l'avantage de disposer de solutions techniques permettant une flexibilité d'implantation des installations de surface par rapport à celles du fond milite en faveur de la solution de transfert des colis par descenderie déroulée.

Après le chargement en surface d'un colis de stockage dans la hotte, cette dernière est acheminée à travers une descenderie déroulée d'une pente de l'ordre de 10 % jusqu'à la zone centrale. Deux solutions techniques sont actuellement envisagées : un véhicule automoteur et un funiculaire à câbles.

3.3.10.1 Véhicule automoteur

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

Le nombre d'essieux et de roues est lié à la charge transportée (dont la masse atteint 45 tonnes pour la hotte HA et 120 tonnes pour la hotte MAVL) et au niveau d'adhérence requis dans la descenderie. La longueur du plateau est adaptée aux dimensions de la hotte et au nombre d'essieux (5 essieux de 2 roues pour le véhicule HA et 7 pour le véhicule MAVL). La masse à vide de ces véhicules pour le transfert des hottes HA et MAVL est respectivement de l'ordre de l'ordre de 30 et 40 tonnes. La Figure 3.3-20 présente les véhicules actuellement envisagés pour le transfert des hottes en descenderie.

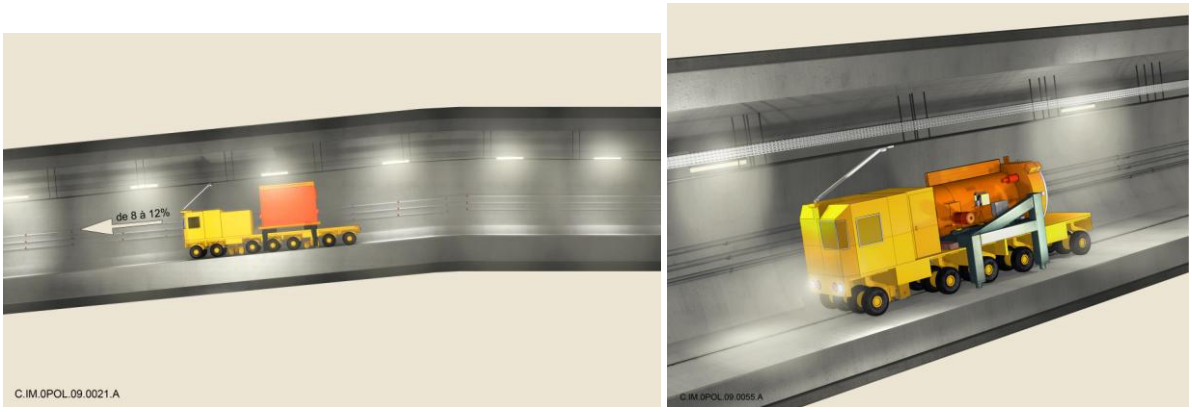


Figure 3.3-20 *Véhicules de transfert en descenderie des hottes MAVL (à gauche) et des hottes HA (à droite)*

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

La prise en charge par soulèvement ou la dépose des hottes est réalisée par le système auto-élévateur du véhicule. Ce principe est assez communément utilisé dans d'autres INB pour le chargement de transporteur quand celui-ci doit être réalisé en l'absence d'unité de levage de charges lourdes (transbordeurs, ponts roulants etc.).

En fonctionnement courant, il est retenu un mode de pilotage automatique pour éviter la présence de personnel et limiter ainsi les expositions aux rayonnements ionisants et les risques liés au facteur humain. Cependant, le véhicule comporte une cabine de conduite blindée permettant à un opérateur de surveiller le déroulement de l'opération de transfert (les écrans de protection de la cabine seront dimensionnés pour autoriser un poste de travail).

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

Par ailleurs, le véhicule est équipé de systèmes indépendants et redondants de maîtrise de la vitesse et de freinage (freins de service, freins de secours, réducteur de vitesse, frein d'ultime secours).

Les dispositions techniques précédentes permettent ainsi de limiter l'occurrence d'une dérive du véhicule et d'une perte de maîtrise de la vitesse dans la descenderie. De plus, sa vitesse de fonctionnement envisagée est limitée à 10 Km/h en descente (cf. section 3.4.3.2).

Les fortes puissances électriques nécessaires au transfert de charges lourdes sur une pente de l'ordre 10 à 12 % et le nombre important de pneumatiques conduisent à concevoir des véhicules ayant une charge calorifique importante (de l'ordre de 30 à 50 MJ). En cas de départ de feu sur le véhicule et de sa propagation, la situation d'incendie constitue un agresseur de la hotte et par conséquent du colis de stockage qu'elle contient. Les options de sûreté retenues vis-à-vis de cette situation sont les suivantes :

- La conception des véhicules limite autant que faire se peut leur charge calorifique et privilégie sa répartition pour éviter la propagation de l'incendie et solliciter faiblement la hotte ;
- Les hottes de transfert doivent être dimensionnées pour résister à un incendie plausible et protéger le colis de stockage, même après une collision notamment dans la descenderie ;
- Les dispositifs de détection/extinction embarqués sur les véhicules doivent être mis en place et rester fiables et disponibles même après une collision au cours du transfert.

Le risque d'incendie et les mesures de maîtrise du risque associées sont présentés dans la section 3.4.3.1.

3.3.10.2 Funiculaire à câbles

Il est actuellement envisagé comme solution de transfert la possibilité d'utiliser un funiculaire. Il est composé de deux mobiles en équilibre reliés par des câbles (le chariot de transfert et le contrepoids), circulant sur des rails de roulement qui sont mus par un système de poulies à friction. La solution envisagée se fonde sur des références et un retour d'expérience établis pour le transport de charges très lourdes (plusieurs centaines de tonnes en écluses), à haut débit (plusieurs dizaines de kilomètres à l'heure pour le transport de personnes) et un très haut niveau de fiabilité.

Cette solution envisagée (cf. Figure 3.3-21) correspond à un funiculaire comprenant :

- un chariot de transport (70 tonnes) et un contrepoids liés par des câbles tracteur-porteurs de 54 mm de diamètre ;
- un roulement des équipements (chariot et contrepoids) assuré par des galets métalliques sur des rails. Des dispositifs d'anti déraillement sont mis en place pour assurer le maintien des mobiles sur leurs rails ;
- un entrainement des câbles tracteurs-porteurs par friction sur des poulies implantées en station haute de la descenderie ;
- une adhérence des câbles gérée au moyen de poulies et de câbles de retour de boucle, de 40 mm de diamètre, et d'un dispositif d'ajustement de la tension par un contrepoids positionné en station basse du funiculaire.

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

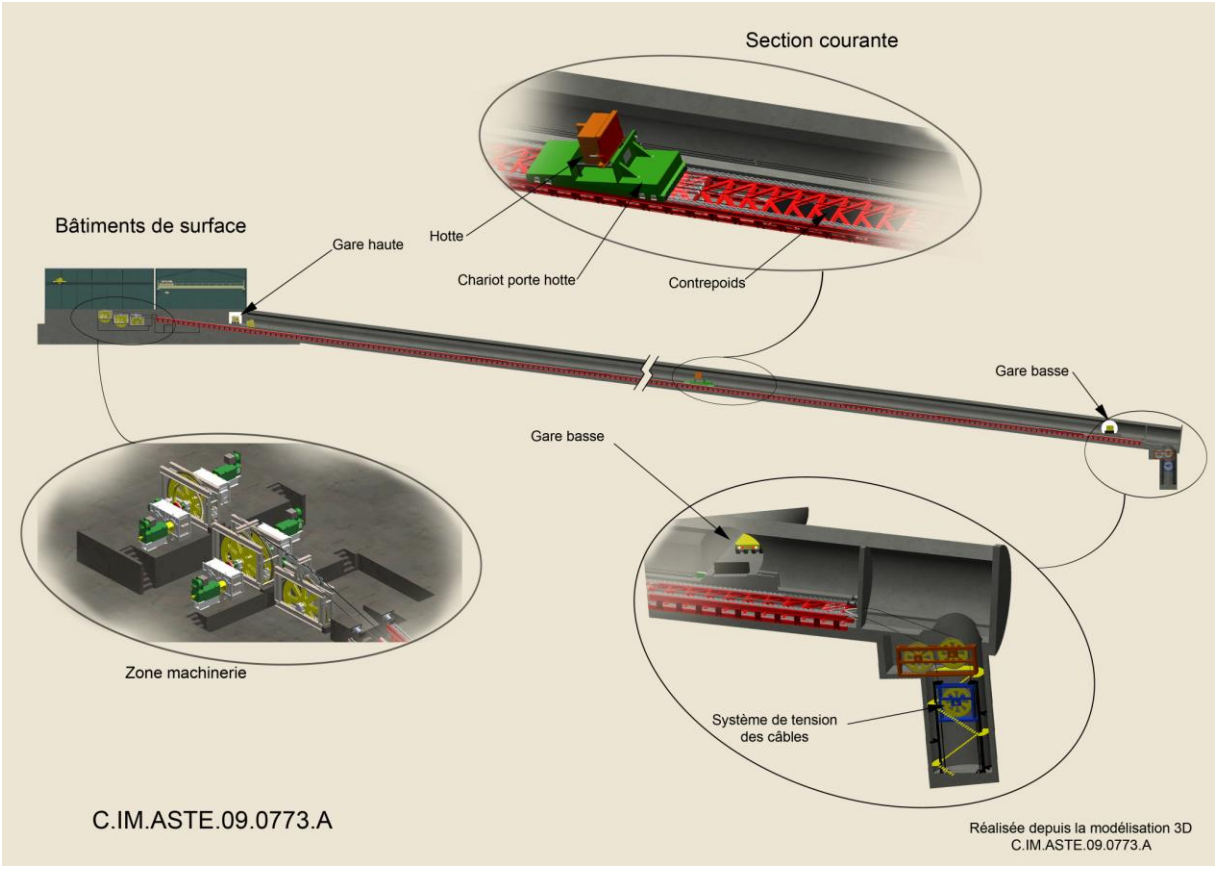


Figure 3.3-21 *Principes de conception d'un funiculaire de transfert de hottes HA et MAVL*

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

Pour la maintenance et éventuellement le dépannage des équipements situés dans la descenderie, deux accès sécurisés sont envisagés de part et d'autre de la voie : un funiculaire de service pour le transport de personnel de maintenance et du petit matériel et un accès aménagé avec escaliers pour les piétons.

L'absence de motorisation sur le chariot et le regroupement de la plus grande part des charges calorifiques du système dans la station haute du funiculaire permet de limiter, par conception, le risque d'incendie dans la salle des machines dédiée et située en surface. Celle-ci dispose, à poste fixe, de moyens de détection d'incendie et, le cas échéant, d'extinction. Les moyens de lutte et d'intervention en situation d'incendie localisés au niveau de la surface pourront intervenir dans des délais adaptés aux enjeux.

Compte tenu du risque de perte de maîtrise de la vitesse dans la pente, il est retenu d'équiper le funiculaire d'un ensemble de dispositifs de freinage redondants et indépendants. Les dispositifs de sécurité envisagés permettent de limiter l'occurrence d'un tel événement. En complément, un système d'arrêt en fin de stations haute et basse permet l'arrêt du funiculaire en cas de sur-course, pour une vitesse réduite d'arrivée en station. Ce système, du type butée amortie de fin de voie ferroviaire, sera dimensionné pour que le niveau de décélération perçu par le chariot de transport soit sans effet sur la hotte et le colis de stockage qu'elle contient. De plus, la vitesse de fonctionnement du funiculaire est limitée à 10 Km/h (cf. section 3.4.3.2).

La faible pente considérée (de l'ordre de 12 %) permet une sécurité de fonctionnement du funiculaire reposant sur un ensemble de dispositions technologiques éprouvées et la mise en place de dispositifs indépendants permettant le freinage et l'arrêt du chariot de transport. L'analyse d'une situation de séisme de niveau SMS lors d'un transfert de colis reste à évaluer d'ici la DAC pour vérifier le comportement des composants du funiculaire et le maintien du chariot et du colis transporté.

3.3.11 Les systèmes de transfert des hottes de la zone centrale jusqu'à la zone de stockage

Exigences de sûreté

Les systèmes de transferts des hottes de la zone centrale jusqu'à la zone de stockage assurent une fonction opérationnelle relative à l'activité du stockage. Ils ne participent pas directement aux fonctions de sûreté mais ils contribuent indirectement à leur accomplissement par la maîtrise des risques de perte de confinement des colis de stockage et des risques d'exposition aux rayonnements ionisants en situation normale ou accidentelle de fonctionnement.

Options de sûreté/conception

La conception des systèmes de transfert de la zone centrale jusqu'à la zone de stockage est similaire à celle présentée dans la section précédente, les risques de dérive et de survitesse étant moindre en raison d'une pente maximale dans les galeries de liaison égale à 3 %.

Cette étape consiste donc à acheminer la hotte, une fois arrivée au niveau du stockage, jusqu'à la zone de stockage au travers du réseau de galeries de liaison dont la pente maximale est de 3 % pour le transfert des colis. Ce transfert est réalisé à l'aide d'un véhicule capable de transporter des charges lourdes sur des distances plurikilométriques. Quel que soit le mode de transfert retenu, à son arrivée dans la zone de stockage, la hotte est déposée dans le carrefour au droit de la galerie d'accès à l'alvéole en exploitation.

Dans le cas d'un transfert des hottes entre la surface et les installations souterraines par un véhicule automoteur, il est envisagé de poursuivre jusqu'à la zone de stockage avec le même véhicule.

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

3.3.11.1 Véhicule automoteur sur pneus

La conception du véhicule de reprise de la hotte au fond est proche de celle du véhicule présenté en section 3.3.10.1 pour le transfert en descenderie (véhicule automoteur et autoélévateur doté de roues pneumatiques directionnelles, motorisation hydraulique alimentée par lignes électriques de type trolley) mais avec une motorisation moins puissante compte tenu de la faible pente (3 %), la vitesse de transfert restant de l'ordre de 10 Km/h. Cette solution présente l'avantage de disposer d'un équipement adapté à la flexibilité de l'architecture et de sa capacité à évoluer sur la durée de l'exploitation.

3.3.11.2 Navette de transfert électrique

Une navette de transfert électrique automotrice ou composée d'un ensemble « locotracteur avec lorry » circulant sur une voie ferrée est une seconde solution technique. La mise en place de la voie dans les galeries de liaison conduirait à disposer des aiguillages ou des rotondes (dans le cas des navettes automotrices) dans les carrefours menant jusqu'aux zones de stockage MAVL ou HA. Cette solution présente l'avantage de réduire la charge calorifique par rapport aux véhicules sur pneus au regard du risque d'incendie mais contraint la flexibilité de l'architecture souterraine (rayon de courbure pour le transfert par rails) et la simplicité de manœuvre des véhicules recherchée pour ce type de transfert.

3.3.12 Les systèmes de transfert des hottes dans la zone de stockage jusqu'à l'alvéole de stockage

Exigences de sûreté

Les systèmes de transfert des hottes jusqu'à l'alvéole de stockage assurent une fonction opérationnelle relative à l'activité du stockage. Ils ne participent pas directement aux fonctions de sûreté mais ils contribuent indirectement à leur accomplissement par la maîtrise des risques de perte de confinement des colis de stockage et des risques d'exposition aux rayonnements ionisants en situation normale ou accidentelle de fonctionnement.

Options de sûreté/conception

La conception des systèmes de transfert de la zone de stockage jusqu'à l'alvéole de stockage est similaire à celle présentée dans la section 3.3.10, les risques de dérive et de survitesse étant moindre en raison d'une pente nulle dans les galeries d'accès.

Cette étape, d'une longueur hectométrique, correspond au transfert de la hotte dans la galerie d'accès pour permettre son accostage sur l'alvéole. Cette opération est réalisée à l'aide d'un équipement spécifique doté d'une grande précision de positionnement, qui est désigné par le terme « navette d'accostage ».

La navette d'accostage est l'équipement qui permet donc la reprise d'une hotte dans le carrefour desservant la galerie d'accès et qui l'achemine jusqu'à l'alvéole de stockage (cf. Figure 3.3-23).

La solution d'une navette sur rails, circulant en ligne droite sur des rails fixés au radier de la galerie d'accès par rail peut être privilégiée par rapport à la solution d'un engin sur roues pour mieux maîtriser son déplacement et pour la précision de son accostage ainsi que pour la minimisation du gabarit de l'engin.

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

Les principales caractéristiques des navettes sont les suivantes :

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

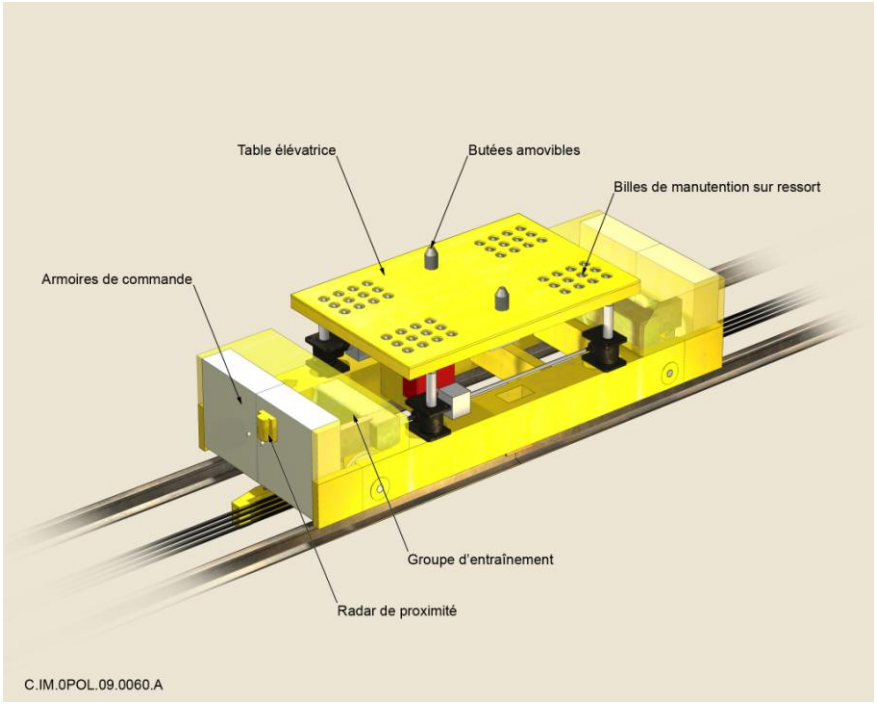


Figure 3.3-22 Exemples d'une navette de transfert HA sur rails

L'alimentation en énergie électrique de la navette sur pneus est assurée par un ensemble de batteries. Un ou plusieurs postes de chargement des batteries sont implantés dans la zone de stockage des colis. Leur implantation n'est pas encore fixée et dépend de l'étude des dangers relatifs à la présence de ces batteries (dégagement d'hydrogène lors de leur charge). L'alimentation en énergie électrique de la navette sur rail est assurée par rail électrique encastré dans le radier de galerie et des patins frotteurs installés sous la navette.

La collision des navettes avec un obstacle ou des équipements placés dans les galeries est limitée par la présence :

- de détecteurs de présence de type radar qui s'assurent de l'absence d'obstacle dans le gabarit de passage de la navette ;
- d'un système de guidage par caméras permettant de corriger la trajectoire des navettes sur pneus ;
- de rails pour la navette sur rails.

Le contrôle de la vitesse dans les galeries de faible pente est assuré par le frein moteur (transmission mécanique réversible d'entrainement des roues) et un système de freinage électromécanique par friction (disques et plaquettes) installé sur chaque roue. La navette sur rail est équipée de freins de secours (mâchoires de serrage du rail) assemblés des deux côtés de la navette.

Ces dispositions permettent de limiter l'occurrence d'une situation de collision au cours du transfert.

Concernant le risque d'incendie, la navette sur rails présente une charge calorifique inférieure à la navette sur pneus, limitant ainsi les conséquences d'un incendie par une puissance moindre.

Il est aussi important de noter que les risques de collision entre les navettes et les véhicules automoteurs ou navettes de transfert sont maîtrisés par des séquences d'exploitation gérées par contrôle-commande interdisant la présence simultanée de deux véhicules dans la zone d'échange.

3.3.13 Les systèmes de mise en alvéole des colis HA

Exigences de sûreté

Les systèmes de mise en alvéole de stockage ne participent pas directement aux fonctions de sûreté mais ils contribuent indirectement à leur accomplissement par la maîtrise des risques de perte de

confinement des colis de stockage et de l'alvéole et des risques d'exposition aux rayonnements ionisants en situation normale ou accidentelle de fonctionnement.

Options de sûreté/conception

La conception des systèmes de mise en alvéole des colis HA a privilégié :

- Une minimisation des risques d'incendie par la limitation de la charge calorifique et des sources d'ignition des navettes d'accostage et des systèmes de poussée (robot) des colis dans l'alvéole, par la détection rapide d'un départ de feu associée à une extinction automatique embarquée ;
- La limitation de l'exposition externe du personnel par le choix d'un accostage et d'un transfert des colis dans l'alvéole au moyen d'un pilotage automatique à distance depuis un poste de travail déporté soit en salle de commande soit dans la galerie d'accès ;
- Une minimisation des effets d'une défaillance par la limitation des vitesses de fonctionnement pour l'accostage ;
- Des systèmes d'exploitation simples pour une manœuvre facilitée et aisée des systèmes.

Au droit de l'alvéole en exploitation, la navette dépose la hotte sur ses jambes dans des platines encastrées dans le radier de la galerie d'accès. Lorsque l'accostage est réalisé, un système de verrouillage de l'enceinte sur l'operculaire est activé. La connexion électrique est réalisée et permet l'alimentation en énergie des motorisations électriques de déverrouillage puis d'ouverture des portes de l'operculaire et de l'enceinte blindée. L'ouverture des portes de l'alvéole et de la hotte peut alors être initiée.

La mise en alvéole des colis de stockage (cf. Figure 3.3-23) est étudiée au moyen de 2 équipements indépendants : un premier système utilisé pour le transfert et l'introduction des colis en tête d'alvéole et un second système pour la mise en position définitive de stockage des colis à l'intérieur de l'alvéole. Ceci présente l'avantage de limiter le temps d'immobilisation de la hotte de transfert à la seule opération d'introduction du colis dans la tête d'alvéole et entre autres de minimiser les expositions potentielles. Cela permet également la mise en œuvre d'une hotte de transfert plus compacte, mieux adaptée aux conditions de transport dans l'architecture souterraine du stockage et dans la descenderie (encombrement, masse…) et donc de réduire les occurrences de collisions.

Toutes les 2 ou 3 introductions de colis HA, le second équipement est utilisé. Il s'agit d'un équipement contenant un robot poussant pas à pas les colis qui, après son accostage à l'alvéole, permet le transfert du groupe de colis jusqu'à sa position définitive de stockage.

Le robot pousseur est alimenté et piloté depuis la galerie d'accès (en tête de l'alvéole) par un ombilical.

La solution présentée répond aux objectifs en matière de sûreté et radioprotection. Elle est aussi adaptée à une reprise des colis dans le cadre de la réversibilité. Le robot permet d'agripper un colis depuis sa position de stockage dans l'alvéole et de le ramener en tête d'alvéole. Le colis peut alors être extrait de l'alvéole au moyen de la chaîne pousseuse pour être ensuite réintroduit dans la hotte de transfert et ramené dans les installations de surface.

Des tests de mise en place (jusqu'à trois colis de stockage) et de retrait des colis (un par un) sur une maquette à échelle 1 avec une longueur d'alvéole allant jusqu'à 100 m ont été réalisés dans le cadre du projet ESDRED et permettent de montrer la faisabilité de ces opérations.

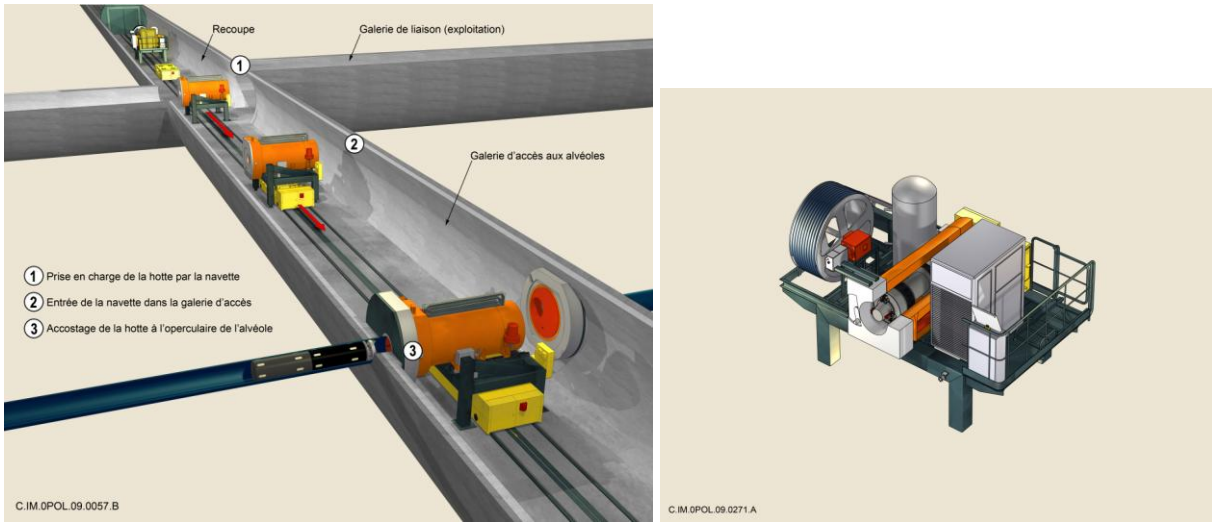


Figure 3.3-23 Systèmes de mise en alvéole des colis HA

3.3.14 Les systèmes de mise en alvéole des colis MAVL

Exigences de sûreté

Les systèmes de mise en alvéole de stockage assurent une fonction opérationnelle relative à l'activité du stockage. Ils ne participent pas directement aux fonctions de sûreté mais ils contribuent indirectement à leur accomplissement par la maîtrise des risques de perte de confinement des colis de stockage et de l'alvéole et des risques d'exposition aux rayonnements ionisants en situation normale ou accidentelle de fonctionnement, notamment en réduisant les risques de chute et d'incendie.

Options de sûreté/conception

La conception des systèmes de mise en alvéole des colis MAVL a privilégié :

- Une minimisation des risques d'incendie par la limitation de la charge calorifique et des sources d'ignition des systèmes utilisés pour le déchargement dans la cellule de manutention et le transfert dans la partie utile de l'alvéole de stockage, par la détection rapide d'un départ de feu associée à une extinction automatique fixe ou embarquée ;
- Une minimisation des risques de chute de colis par la limitation de la hauteur de levage des colis ou la mise en place de dispositifs réduisant la hauteur de chute (table élévatrice, plateau suiveur…),
- Une minimisation des risques de dérive et de collision par la présence de systèmes de guidage mécanique, la limitation de la vitesse maximale de fonctionnement des équipements et la présence de systèmes de freinage redondants et indépendants associés à une pente nulle dans les alvéoles ;
- La limitation de l'exposition externe du personnel par le choix d'un accostage et d'un transfert des colis dans la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole au moyen d'un pilotage automatique à distance depuis un poste de travail déporté soit en salle de commande soit dans la galerie d'accès au niveau de la zone d'accostage ;
- Une minimisation des effets d'une défaillance par la limitation des vitesses de fonctionnement pour l'accostage ;
- Des systèmes d'exploitation simples pour une manœuvre facilitée et aisée des systèmes et permettant de couvrir l'ensemble des colis à stocker.

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

- La mise en place des colis après pré empilage, permet de stocker des colis de stockage qui peuvent être de dimensions et masses importantes (jusqu'à 25 t) ;
- La mise en place individuelle des colis, est adaptée à des colis de stockage de dimensions et de masse plus réduites (jusqu'à 15 t).

Ils permettent de stocker des piles de colis de stockage MAVL dans une alvéole de plusieurs centaines de mètres de longueur en étant opérés à distance.

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

3.3.14.1 Mise en place des colis après pré empilage

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

Pour ce processus, il est envisagé actuellement deux systèmes complémentaires : un pont pour assembler la pile de colis et un plateau « suiveur » pour limiter les conséquences d'une chute éventuelle au moment de la constitution de cette pile.

L'ensemble des équipements comprend (cf. Figure 3.3-24) :

- des équipements de manutention des colis avec principalement l'unité de levage de type pont roulant (ou portique) qui a pour fonction de former la pile de colis par gerbage à laquelle pourrait être associé un plateau suiveur équipant la table de réception des colis, permettant de limiter la hauteur de survol des colis lors de l'élévation du colis pour réaliser la pile ;
- le chariot porteur qui se déplace, à la vitesse de 10 m/min, sur des rails encastrés dans le radier du génie civil de l'alvéole de stockage. Il comprend dans sa partie centrale un plateau élévateur actionné hydrauliquement, qui permet de soulever une pile de colis d'environ 50 mm puis de la reposer en appui sur des longrines, en configuration de stockage. Les besoins en énergie électrique sont fournis par des batteries embarquées rechargeables et le moyen de communication permettant son pilotage à partir d'une salle de conduite déportée et la supervision du déroulement des opérations est assuré par un système sans fil utilisant la technologie des ondes transmises par radiofréquence ;
- un plancher mobile transbordeur (ou un aiguillage) pour diriger le chariot porteur sur une des deux voies de stockage, après ouverture des portes séparant la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole dédiée au stockage.

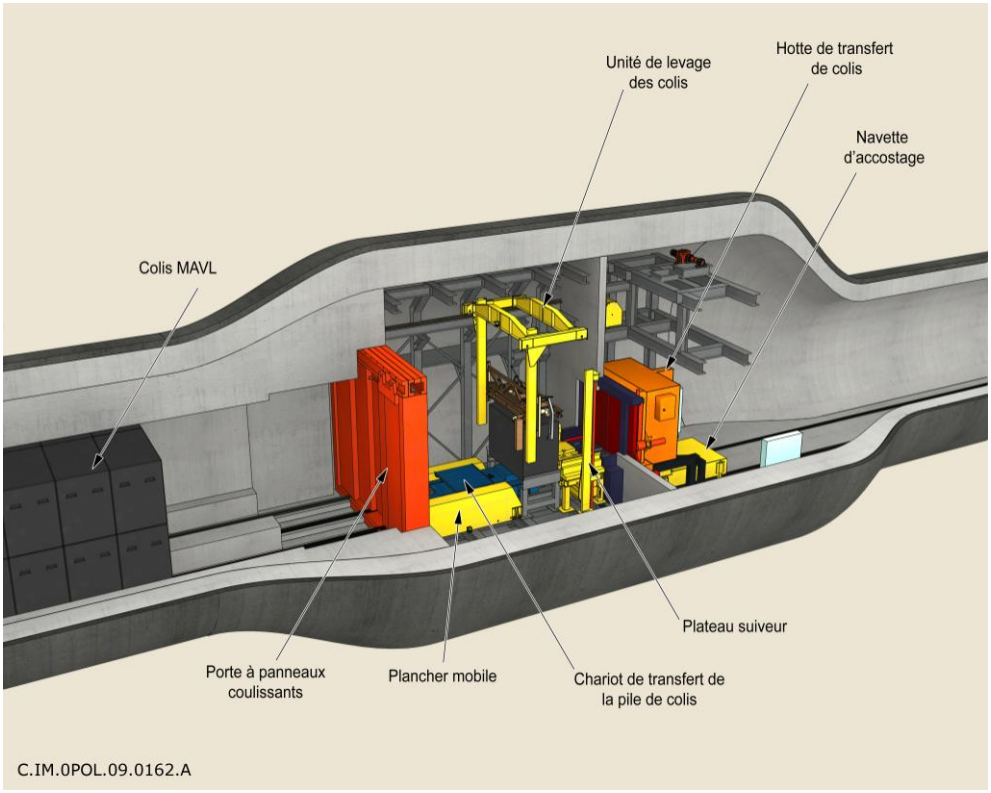


Figure 3.3-24 Système de mise en place des colis MAVL après pré-empilage

La solution présentée répond aux objectifs de sûreté au travers d'un ensemble de dispositions de conception et de la mise en place de dispositifs indépendants permettant d'assurer sa sécurité de fonctionnement.

3.3.14.2 Mise en place individuelle des colis

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

Ce concept a été développé suivant deux solutions qui se distinguent par le mode de remplissage de l'alvéole ; le gerbage d'une pile en fond d'alvéole ou la mise en place des colis par couches successives :

- Le gerbage d'une pile de colis (2 ou 3 colis) en alvéole est assuré par un chariot élévateur à fourches (« stockeur ») qui roule dans des rigoles implantées dans le radier de l'alvéole ;
- La mise en place des colis par couches successives est réalisée par un « pont gerbeur » qui se déplace comme un pont roulant classique sur des corniches implantées en partie supérieure des parois verticales de l'alvéole.

<u>Description du processus avec stockeur</u>

L'ensemble des équipements comprend (cf. Figure 3.3-25) :

- le stockeur qui assure un mouvement de translation pour son déplacement dans l'alvéole ainsi qu'un mouvement de levage pour le gerbage des colis. Il présente une structure composée de deux sommiers parallèles et un mât qui intègre l'outil de préhension par fourches, son guidage et sa motorisation. Les sommiers sont équipés de galets roulant sur les rails encastrés courant dans le radier du génie civil, qui sont actionnés par des motorisations implantées en partie arrière des sommiers. En partie arrière du mât, sont implantées les batteries fournissant l'énergie électrique à l'engin ainsi que les armoires électriques et de contrôle commande permettant son fonctionnement. La fonction de levage est assurée par un système constitué de deux treuils à câble indépendants et redondants. Cette technologie est similaire à celle utilisée sur les ponts roulants nucléarisés équipant des cellules irradiantes du site AREVA de La Hague ;

- des équipements de radioprotection avec des portes blindées en amont et en aval de la cellule de manutention ;
- des équipements annexes et complémentaires qui permettent de dérouler le processus, dont un plancher mobile transbordeur équipé d'une plaque tournante pour diriger le stockeur devant la hotte pour la prise en charge du colis puis après retournement, pour le présenter face à une des voies de stockage dans l'alvéole.

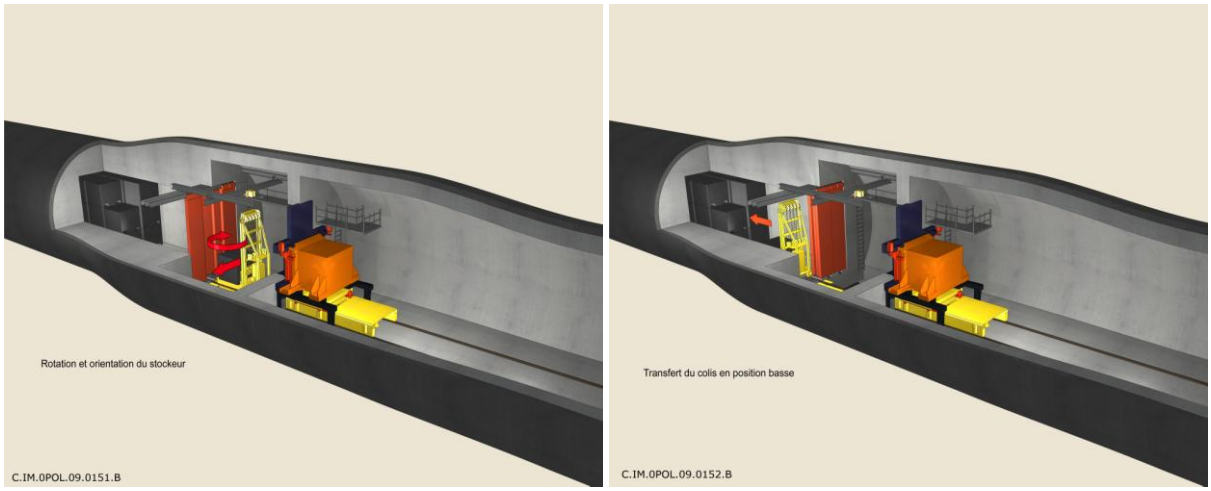


Figure 3.3-25 Mise en place individuelle des colis MAVL avec le stockeur

La solution présentée répond aux objectifs de sûreté au travers d'un ensemble de dispositions de conception et de la mise en place de dispositifs indépendants permettant d'assurer sa sécurité de fonctionnement. La hauteur potentielle de chute étant supérieure aux autres solutions de mise en alvéole présentées, la fonction levage est assurée par des systèmes indépendants et redondants sécurisés et éprouvés dans installations nucléaires en cours de fonctionnement à AREVA La Hague.

Description du processus avec pont gerbeur

Le « pont gerbeur » est un équipement de type pont roulant, avec des sommiers qui circulent sur des rails implantés en corniche dans l'alvéole de stockage, au niveau des colis de la dernière couche. Il est muni de fourches montées sur un mât implanté sur la structure du pont.

L'ensemble des équipements comprend :

- un chariot de transfert pour recevoir le colis de stockage MAVL après son extraction de la hotte et pour le déplacer jusqu'à l'équipement élévateur ;
- un équipement élévateur (« unité de mise à niveau ») qui a pour fonction de mettre le colis en situation pour être repris par le pont gerbeur à la bonne hauteur (celle de la couche en cours d'exploitation) ;
- un pont gerbeur, de portée adaptée à la largeur de l'alvéole, qui est constitué de deux sommiers d'environ 3 m reliés par une poutre sur laquelle se déplace un chariot équipé d'un organe de préhension à fourches (cf. Figure 3.3-26). Les sommiers du pont-gerbeur se déplacent avec un guidage par galets sur deux rails parallèles de type pont roulant, à hauteur de la dernière couche de colis. L'alimentation électrique du pont-gerbeur est prévue par des batteries implantées sur une passerelle située à l'arrière de la poutre.
  La hauteur du chariot est mise en configuration pour l'exploitation d'une couche donnée par adaptation de la hauteur de l'outil de préhension. Cette opération est faite dans la cellule de manutention au début de l'exploitation de chaque couche.
  Le contrôle commande du pont pourrait se faire en utilisant la technologie de la transmission sans fil par radio fréquence, à l'instar de ce qui est présenté précédemment pour les autres concepts, ou, éventuellement, par des câbles rayonnants reposant sur les corniches des chemins de roulement.
- des équipements de radioprotection avec principalement la porte d'accostage et une porte séparative séparant la cellule de manutention de la cellule de stockage.

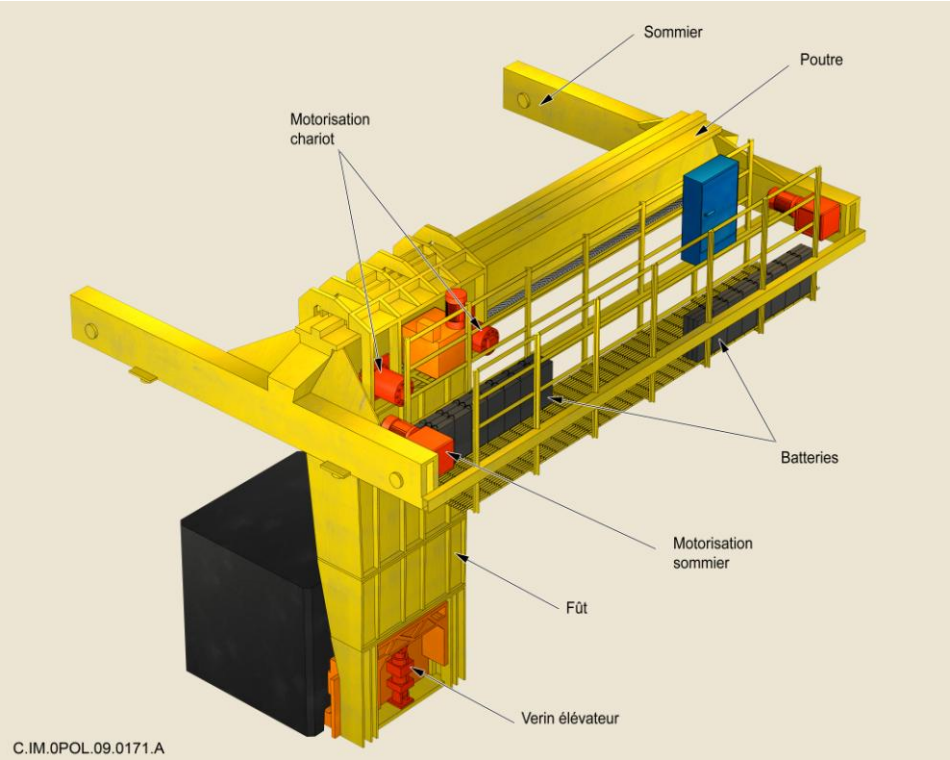


Figure 3.3-26 Mise en place individuelle des colis MAVL avec le pont gerbeur

La solution présentée répond aux objectifs de sûreté en exploitation au travers d'un ensemble de dispositions de conception et de la mise en place de dispositifs indépendants permettant d'assurer sa sécurité de fonctionnement.

3.4 Maîtrise des risques

3.4.1 Rappel de la méthodologie

La démarche de justification de la conception des installations de stockage des déchets HA et MAVL s'appuie sur l'étude des situations de fonctionnement normal, incidentel et accidentel auxquelles l'installation peut être confrontée.

En complément, la prise en compte des agressions d'origine interne et externe à l'installation permet de définir des dispositions visant, d'une part à éviter que ces agressions ne soient à l'origine d'une situation incidentelle ou accidentelle, et d'autre part à protéger les équipements nécessaires à la maîtrise des fonctions importantes pour la sûreté.

L'analyse commence par l'identification des sources de danger associées aux activités réalisées dans les installations ainsi qu'à la présence de produits présentant des dangers tels que les colis de stockage. Elle est structurée par composantes physiques (installations de transfert, installations souterraines) et par activités (exploitation, fermeture voire construction). Chaque risque est ainsi caractérisé par une ou des sources de danger à l'origine du risque et des mesures de réduction de risques proposées en appliquant le principe de défense en profondeur (prévention, surveillance et maîtrise des conséquences). Cette caractérisation conduit à porter un jugement qualitatif sur le niveau de risque résiduel et à retenir des situations de dimensionnement des installations en fonction de la vraisemblance du risque et des conséquences potentielles sur les travailleurs, le public et l'environnement.

Cette section présente les principaux résultats de l'analyse des différents risques à ce stade de la conception selon le découpage classique suivant :

- les risques d'origine nucléaire (cf. section 3.4.2) ;

- les risques non nucléaires d'origine interne (cf. section 3.4.3) ;
- les risques non nucléaires d'origine externe (cf. section 3.4.4).

Les risques spécifiques à la durée d'exploitation (au moins 100 ans) des installations de stockage sont abordés succinctement (cf. section 3.4.5).

3.4.2 Risques d'origine nucléaire

Les installations de transfert et souterraines ont pour fonction principale d'accueillir des colis de stockage dans les alvéoles construites à cet effet. En fonctionnement normal des installations, les colis de stockage transférés sont des sources de rayonnements. Les installations sont donc soumises à la réglementation visant à protéger contre les rayonnements ionisants le personnel, le public et l'environnement.

Les sources de rayonnements ionisants présentent des risques d'expositions externe et interne pour le personnel présent sur le site, le public et l'environnement. La connaissance des risques radiologiques et du temps de présence des personnes dans les différents locaux de l'installation permet de définir les moyens de protection et leur localisation.

L'identification des risques est faite sur la base des données relatives aux caractéristiques des sources de rayonnements (spectre des radionucléides, activités par famille de colis de stockage…) et des données relatives au procédé d'exploitation (y compris les opérations de surveillance/contrôle radiologique et de maintenance) mis en œuvre dans l'installation en fonctionnement normal.

Les risques radiologiques dans les installations nucléaires sont :

- L'exposition externe : Elle est provoquée par les rayonnements ionisants émis par les substances radioactives présentes dans les colis de stockage et situées à l'extérieur de l'organisme.
- L'exposition interne : Elle est liée à la présence de substances radioactives à l'intérieur de l'organisme suite à une incorporation par inhalation, ingestion ou passage transcutané.

En exploitation, comme pour les installations de surface, les fonctions de sûreté associées aux installations souterraines du stockage se déduisent des voies d'atteintes et des risques principaux induits par le transfert et la présence des déchets radioactifs dans les colis de stockage. Il s'agit de :

- confiner la radioactivité, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion de substances radioactives. Cette fonction permet également, de fait, de confiner d'éventuels toxiques chimiques ;
- protéger les personnes contre l'exposition externe ;
- assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité ;
- évacuer la puissance thermique résiduelle des déchets ;
- évacuer les gaz de radiolyse en provenance des colis de déchets.

La présentation des situations et dispositions retenues pour maintenir chacune de ces fonctions est déclinée dans les sections suivantes avec pour objectif de montrer que les risques associés sont maîtrisés.

3.4.2.1 Risques de dispersion de matières radioactives

Origine du risque

L'exposition interne des travailleurs et du public à des poussières radioactives doit être rendue impossible lors du fonctionnement normal des installations. La conception des locaux et le processus d'exploitation mis en œuvre dans les installations de transfert et souterraines doivent permettre de confiner et d'éviter le contact direct des travailleurs avec des substances et particules radioactives non confinées. Les risques de dispersion de substances radioactives résultent du transfert des hottes contenant un colis de stockage de type MAVL ou HA et de leur mise en alvéole de stockage. Durant ces opérations, du personnel est présent dans les ouvrages de liaison surface/fond, dans les galeries de liaison et d'accès. L'accès aux alvéoles de stockage est interdit.

En fonctionnement normal, ce risque est dû à :

- la contamination surfacique labile externe des hottes et des colis de stockage ;
- l'émission de radionucléides gazeux par les colis de déchets (plusieurs colis de type MAVL ne sont pas étanches à certains radionucléides) : tritium, krypton, carbone…

Les situations d'incidents et d'accidents possibles sont aussi prises en compte afin de limiter la dissémination de substances radioactives. Dans les installations souterraines, les situations qui peuvent conduire à une dissémination de substances radioactives sont celles impliquant un colis de stockage. La détérioration des colis de stockage peut être due notamment à :

- une chute ou collision de la hotte lors d'une opération de transfert dans la descenderie, le puits ou les galeries de transfert ;
- une chute de colis lors de sa mise en alvéole de stockage essentiellement pour les colis MAVL au niveau de la cellule de manutention et de la partie utile de l'alvéole de stockage ;
- un incendie du véhicule de transfert, de la navette ou des équipements de manutention au niveau des alvéoles ;
- une explosion au sein d'une alvéole de stockage MAVL.

Il convient également de considérer les risques de migration par la voie air (poussières) de substances radioactives depuis la zone nucléaire vers la zone en construction dans la mesure où l'exploitation de la zone nucléaire et la construction des alvéoles sont menées de manière concomitante. Les zones de travaux seront isolées de la zone nucléaire par des dispositifs (portes, sas…) afin d'assurer les fonctions suivantes :

- le confinement de la zone nucléaire vis-à-vis de la zone en construction dans toutes les situations de fonctionnement ;
- l'évacuation du personnel présent dans les zones du fond en situations accidentelles, notamment l'incendie ;
- la protection radiologique des personnes vis-à-vis des sources radioactives présentes en zone nucléaire.

Dispositions

L'objectif est de maintenir un confinement des substances radioactives et la permanence d'au moins un système de confinement entre les zones contaminées et les zones non contaminées (zone en construction) ou l'environnement.

En situation normale d'exploitation, les principes de base relatifs à la prévention de la dissémination des substances radioactives consistent :

- à maintenir un niveau de contamination aussi faible que possible dans les locaux de l'installation ;
- à limiter les rejets de substances radioactives à l'extérieur de l'installation.

L'application de ces principes conduit à interposer différents systèmes de confinement entre l'environnement et les substances radioactives. La spécificité du stockage souterrain impose de séparer les zones en construction des zones nucléaires et les flux correspondants (matériels, air) (cf. *Figure 3.3-19*).

Dans les installations nucléaires, on distingue plusieurs systèmes de confinement, chacun de ces systèmes peut être constitué par :

- un (ou plusieurs) confinement(s) statique(s). Le nombre de confinements statiques entre les substances radioactives et les personnes (travailleur, public) ou l'environnement dépend des risques de dissémination identifiés et de la quantité de substances radioactives qui peut être disséminée ;
- un (ou plusieurs) confinement(s) dynamique(s). Ce confinement pallie les défauts d'étanchéité ou les ruptures du confinement statique. Il est composé d'un système de ventilation spécifique et de dispositifs appropriés d'épuration d'air.

La fonction du premier système de confinement est d'empêcher la dissémination de substances radioactives dans les zones de travail et dans l'environnement. Il est généralement placé au plus près

des substances radioactives et contribue au maintien de la propreté radiologique des locaux (contamination) de manière à éviter tout risque d'exposition interne des personnes. Dans les installations souterraines, les colis primaires et de stockage constituent un premier confinement statique pour les particules et aérosols radioactifs. Celui-ci est complété d'un deuxième confinement statique assuré par la hotte de transfert. Afin de maintenir un niveau de contamination le plus faible possible dans les installations du fond y compris la descenderie, la contamination surfacique labile des colis de stockage et des hottes est la plus faible possible et en tout état de cause inférieure aux seuils retenus par la réglementation des transports, à savoir une contamination non fixée limitée à 4 Bq/cm^2 en émetteurs β, γ et 0,4 Bq/cm^2 en émetteurs α puisque les colis primaires sont aussi limités à cette valeur. Les colis et hottes font l'objet de contrôles périodiques de non contamination.

Certains colis de stockage MAVL sont constitués de colis de déchets qui génèrent de l'hydrogène par radiolyse et ne sont pas étanches par conception. Par conséquent, un relâchement de gaz radioactifs est observé pour certains types de colis MAVL. La nature des gaz radioactifs présents (notamment le tritium, le krypton, le carbone…) ne permet pas, lors d'un transfert de colis et lors de leur stockage, de disposer de mesures de protection. Pour ces cas spécifiques, le niveau d'exposition résiduelle pour les personnes (personnel et public) doit être minimisé et, en tout état de cause, inférieur à des valeurs spécifiées. Cette exposition résiduelle résulte d'une optimisation entre le dimensionnement des systèmes de confinement (notamment la ventilation pour le personnel présent dans les locaux ou la dilution via la hauteur de cheminée pour le public) et la concentration résiduelle en gaz radioactifs susceptible d'être inhalée. Ainsi, le système de ventilation mis en place complète le confinement statique pour minimiser l'exposition interne du personnel et du public. Ce système de ventilation récupère les substances gazeuses, ainsi que les poussières et aérosols le cas échéant, et les extrait.

La prise en compte de situations accidentelles susceptibles d'induire une dispersion de substances radioactives dans les locaux/zones environnants et dans l'environnement peut conduire à prévoir la conception d'un deuxième système de confinement pour remplir cette fonction. Il comprend la structure des locaux contenant le premier système de confinement, soit pour les installations souterraines et de transfert du stockage :

- la galerie inclinée dédiée au transfert des colis pour la descenderie ;
- les ouvrages verticaux du puits de transfert des colis ;
- les galeries de transfert des colis des infrastructures de liaison jusqu'aux zones de stockage HA et MAVL ;
- les galeries d'accès aux alvéoles HA et MAVL ;
- le chemisage de l'alvéole HA ;
- la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole de stockage MAVL.

En complément, il peut contenir, le cas échéant, les conduits de ventilation et les filtres installés sur ces conduits ou sur les traversées de parois.

Un troisième système de confinement, englobant les deux premiers, pourrait être mis en place afin d'empêcher le rejet de substances radioactives à l'extérieur des galeries, ouvrage et alvéoles en cas de défaillance des deux systèmes de confinement précédents. Pour les installations de transfert et souterraines, il pourrait s'agir des bâtiments situés en surface (pour les installations en interface avec la surface), du milieu géologique accueillant le stockage en profondeur ainsi que du système de ventilation (confinement dynamique). Ce troisième système, utilisé pour des installations qui présentent des risques élevés de dissémination de substances radioactives, ne sera pas nécessaire pour les installations de transfert et souterraines au regard des opérations réalisées et de la maîtrise des risques associés.

Le confinement dynamique est basé sur une cascade de pressions différentielles. Le principe est de conserver la dépression la plus importante dans les zones contaminées ou susceptibles de l'être, de sorte qu'en cas de fuite, les flux d'air soient dirigés des zones les moins contaminées vers les zones les plus contaminées. Ce principe doit être maintenu en cas d'endommagement des dispositifs de confinement statique. Le confinement dynamique est réalisé par un système de ventilation dont le réseau d'extraction est séparé des autres réseaux de ventilation. Suivant les niveaux de contamination, ce réseau d'extraction peut être équipé d'une (ou plusieurs) unité de filtration si nécessaire, localisée

au plus près de la zone de contamination potentielle. Le contrôle, avant rejet dans l'atmosphère, est assuré par des appareils de mesures spécifiques.

Ces dispositions constituent les principales mesures de protection vis-à-vis du risque de contamination. Les fonctions de la ventilation dans les installations nucléaires sont définies dans la RFS II.2, la norme ISO 17873 et le Guide de Ventilation des Installations Nucléaires (édition 07/1987).

Ces fonctions concernent :

- le confinement dynamique : la mise en place d'une hiérarchisation des pressions entre les différents locaux permet (en situation normale, incidentelle ou accidentelle) de limiter le risque de dissémination de substances radioactives à l'intérieur et à l'extérieur de l'installation ;
- l'épuration de l'atmosphère des locaux : la ventilation permet de diriger les poussières, les composés volatils et les aérosols vers des équipements de collecte, de traitement et d'élimination (filtres, pièges…) ;
- la surveillance de l'installation : l'organisation des écoulements d'air permet de réaliser des mesures significatives vis-à-vis de la dissémination radioactive et de l'incendie ;
- l'assainissement : la concentration en substances radioactives, toxiques ou dangereuses est limitée par le renouvellement de l'air des différents locaux ;
- le conditionnement de l'air pour le fonctionnement correct des matériels et du procédé.

La conception de la ventilation (dépression, taux de renouvellement, nombre de filtres…) d'une installation nucléaire est basée sur une classification des locaux en classes de confinement (C1, C2, C3…). Cette classification est effectuée en considérant les niveaux prévisibles de contamination atmosphérique d'un local en situation normale, incidentelle et accidentelle.

Pour chaque classe, une conception de ventilation (type I, type IIA…) et un système d'épuration d'air spécifiques sont prévus et définis dans la norme ISO internationale 17873.

Le Tableau 3.4-1 présente la synthèse de l'analyse des situations étudiées dans les différentes parties de l'installation au regard des risques prépondérants qui dimensionnent les systèmes de ventilation à ce stade de la conception. Il est important de noter que les classes de confinement issues de cette première analyse reposent sur un état d'avancement de la conception et des hypothèses qui pourront évoluer lors des études ultérieures en vue de la demande d'autorisation de création.

Il sera aussi important de considérer, lors des futurs choix de classes de ventilation, les difficultés associées à l'environnement souterrain et aux grands volumes d'airs susceptibles d'être ventilés, voire filtrés selon les classes de ventilation retenues.

Tableau 3.4-1 Classes de confinement et types de ventilation dans les différentes zones des installations de transfert et souterraines envisagées au stade actuel

Classes de confinement et type de ventilation associés aux contaminations attendues ou visées	**Colis HA**		**Colis MAVL**	
	Situation normale	Situation accidentelle	Situation normale	Situation accidentelle
Puits de transfert des colis	C1/I à C2/IIA (si C<80 LDCA)		C1/I à C2/IIA (si C<80 LDCA)	
Descenderie avec transfert par véhicule automoteur	C1/I (si C<1 LDCA)		C1/I à C2/IIA (collision + incendie)	
Descenderie avec transfert par funiculaire	C1/I à C2/IIA (si C<80 LDCA)		C1/I à C2/IIA (si C<80 LDCA)	
Galeries de transfert	C1/I		C1/I	
Zones de stockage (galerie d'accès)	C1/I		C1/I	
Alvéoles de stockage HA	Non ventilée			

Classes de confinement et type de ventilation associés aux contaminations attendues ou visées	Colis HA		Colis MAVL	
	Situation normale	Situation accidentelle	Situation normale	Situation accidentelle
Zones de stockage MAVL (cellule de manutention et alvéole) – Pré-empilage			C1/I à C2/IIA	
Zones de stockage MAVL (cellule de manutention et alvéole) – Chariot à fourches			C1/I à C2/IIA	
Zones de stockage MAVL (cellule de manutention et alvéole) – Pont gerbeur			C1/I à C2/IIA	

Les résultats de ce tableau se fondent sur les hypothèses suivantes qui devront être confirmées dans les études ultérieures :

- La fonction de protection des colis en situation d'incendie attribuée à la hotte de transfert des colis est supposée acquise ; ce résultat sera conforté au travers d'un plan d'actions incluant des simulations et essais.
- La fonction de protection des colis en situation d'incendie attribuée à la hotte de transfert des colis est considérée comme maintenue suite à une collision dans les galeries de transfert en raison d'une vitesse réduite (faible pente) ; dans la descenderie, en raison d'une pente plus forte, cette hypothèse n'est pas reprise à ce stade pour une situation d'incendie du véhicule de transfert après collision.
- Les situations de non arrêt en fond de puits et en fond de descenderie par funiculaire sollicitent les colis de stockage et conduisent à un relâchement de substances radioactives permettant de rester inférieur à 80 LDCA.
- Dans la zone de stockage MAVL, les situations de chute et collision sont maîtrisées par conception et ne conduisent pas à un relâchement de substances radioactives ; la situation d'incendie est plus difficile à écarter et fera l'objet de simulations complétées d'essais d'ici la DAC.

A titre d'illustration, la Figure 3.4-1 présente un exemple de configuration d'alvéole de stockage MAVL pour laquelle une ventilation nucléaire de type C2 est nécessaire.

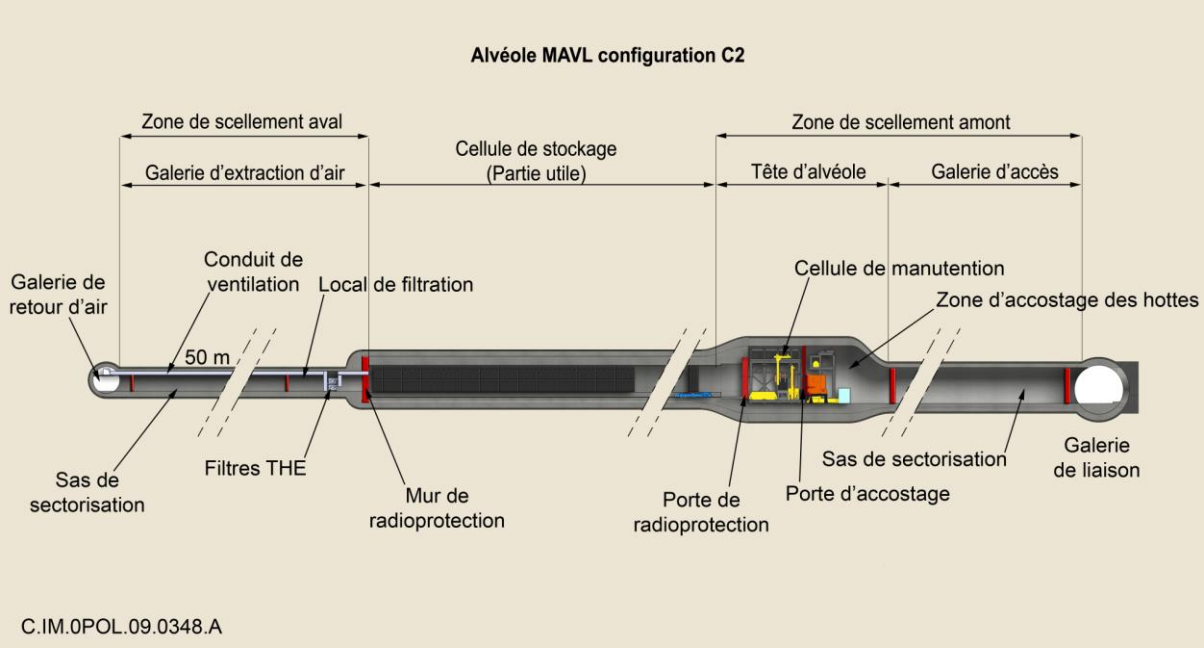


Figure 3.4-1 Illustration d'un module MAVL équipé d'une ventilation nucléaire de type C2

Estimation préliminaire de l'impact des installations souterraines en fonctionnement normal

L'impact en fonctionnement normal est estimé sur la base des effluents gazeux qui proviennent essentiellement du dégazage des colis de stockage MAVL placés dans les alvéoles de stockage des installations souterraines. Ces gaz sont produits pendant toutes les phases de vie de l'installation et constituent un rejet « chronique ».

Une première estimation a été réalisée en considérant le dégagement gazeux de l'ensemble de l'inventaire des colis de type B5 considérés comme enveloppe des autres colis MAVL de par l'absence de matrice.

Les radionucléides gazeux sont le tritium, le krypton 85 et le carbone 14 qui présentent respectivement les valeurs de relâchement suivantes : 420 Bq/h/fût, 7080 Bq/h/fût et 420 Bq/h/fût.

En l'absence d'une implantation des installations, l'estimation a été réalisée conventionnellement à 500 m du point de rejet en considérant 45 530 colis primaires. Le calcul tient compte des activités radiologiques libérées par les colis et d'un facteur de transfert à l'homme intégrant les trois voies d'atteintes à l'organisme. La dose annuelle estimée est de l'ordre de 4 μSv, inférieure à la valeur de 0,25 mSv retenue dans les objectifs de protection.

Dans le cadre des futures études pour l'élaboration de la DAC, il conviendra de disposer d'une meilleure connaissance des rejets réels de l'ensemble des colis MAVL afin d'affiner le calcul présenté. En complément, dans le cadre d'une optimisation du stockage, des dispositions permettant de diminuer ces rejets seront à analyser, telles que la faisabilité d'étancher les colis primaires (pastille de type « Poral »).

Il est à noter qu'une part relative à un entrainement par la ventilation de substances radioactives provenant de la contamination surfacique non fixée des colis de stockage pourrait être prise en compte ultérieurement. Cependant, les dispositions retenues au niveau des critères d'acceptation de contamination surfacique des colis primaires et des installations de surface pour la constitution des colis de stockage permettent de limiter la contamination surfacique non fixée des colis de stockage et la quantité de substances radioactives susceptible d'être relâchée hors du stockage.

3.4.2.2 Risques d'exposition externe

La prise en compte du risque d'exposition externe est basée sur l'exposition de l'organisme entier aux rayonnements ionisants. Les matériels, les procédés et l'organisation du travail doivent être conçus pour que l'exposition externe individuelle des personnes et du public soit maintenue (en tenant compte de l'exposition interne éventuelle) en dessous des contraintes annuelles définies par l'Andra.

Origine du risque

Les colis de stockage HA et MAVL sont à l'origine de rayonnements ionisants gamma et neutron émis par les déchets qu'ils contiennent. Ils sont sources d'exposition externe depuis leur prise en charge dans les installations de transfert jusqu'à leur positionnement en alvéole de stockage.

Le Tableau 3.4-2 présente les niveaux d'irradiation des colis primaires. Ils sont transférés dans les installations souterraines dans une hotte de radioprotection après leur mise en colis de stockage.

Tableau 3.4-2 Débit d'équivalent de dose au contact des colis primaires

Type de colis		Nature du contenu	DED maximum au contact du colis primaire (Sv/h)
MAVL	B2.2 à B2.6	Fûts en acier contenant des enrobés bitumineux	0,5
	B3.1.2	Conteneur amiante-ciment (CAC) ou en béton (CBF-C'2) contenant des déchets technologique divers	1
	B4.2	Fûts en acier contenant des déchets de structures magnésiens cimentés	3
	B4.3	Fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés	13
	B5.3	CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP UOX/URE/MOX	2,2

Type de colis		Nature du contenu	DED maximum au contact du colis primaire (Sv/h)
	B9	Conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) ou d'exploitation (DAE)	6,5
	B10.2	Conteneurs 500 litres en acier contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	3
	B12.3	Conteneurs « AVM » en acier contenant des effluents vitrifiés issus des rinçages d'équipements de l'usine UP1 de Marcoule	11
HA	C0.1	Conteneur en acier contenant des déchets vitrifiés PIVER	190
	C0.2	CSD-U : verre UMo	9,3
	C0.3	Conteneur en acier contenant des déchets vitrifiés AVM	200
	C1	CSD-V : verre UOX R7/T7 produits suivant la spécification 300 AQ 16	290 (après 50 ans)
	C5	CSD-V : verre UOX R7/T7 (dont les verres à teneur augmentée en actinides produits suivant la spécification 300 AQ 60)	560 (après 60 ans)
	CU3.1	Combustibles usés à base d'uranium	0,74

En raison des valeurs des débits d'équivalent de dose des colis primaires, celles des colis de stockage restent élevées après le complément de colisage et ne permettent pas de prévoir des postes de travail permanents sans protection radiologique pour le personnel, en fonctionnement normal des installations. Il est donc retenu de transférer les colis de stockage dans une hotte de protection radiologique, le pilotage de ce transfert étant réalisé à distance afin de limiter l'exposition des travailleurs.

En fonctionnement dégradé voire accidentel, le risque d'exposition du personnel en charge de l'intervention peut être élevé. L'intervention nécessite une évaluation préalable de l'exposition afin de prévoir l'ajout de protections radiologiques complémentaires et de limiter le temps d'intervention.

Dispositions

Le dimensionnement des protections radiologiques est basé sur les caractéristiques des substances radioactives (rayonnements émis, activités radiologiques, débit de dose) et les modalités d'exposition (temps d'exposition, distance par rapport aux substances radioactives, écrans…) du personnel et du public.

Les moyens usuels de protection des personnes vis-à-vis du risque d'irradiation sont basés sur :

- la mise en place d'écrans entre les substances radioactives et les personnes ;
- l'éloignement des personnes par rapport aux substances radioactives ;
- le temps d'exposition à ces mêmes substances radioactives.

Pour le transfert des colis entre les installations de surface et les alvéoles de stockage, le principe retenu consiste à introduire les colis de stockage dans une hotte blindée dite de « protection radiologique ». Au niveau des alvéoles de stockage HA, la tête d'alvéole est équipée d'un operculaire qui a pour fonction de limiter l'exposition externe dans la galerie d'accès au droit des alvéoles. Concernant la zone MAVL, la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole de stockage sont constituées de murs et parois qui ont pour fonction de limiter les rayonnements ionisants au niveau de la zone d'accostage des hottes en amont de l'alvéole et au niveau du local de filtration situé à l'aval de l'alvéole.

Lors de la phase de fermeture des alvéoles, les opérations nécessitent la mise en place d'écrans de protection radiologiques. Pour les alvéoles MAVL, il est constitué d'une pile de blocs de radioprotection (pouvant se manutentionner comme les colis) qui réduit le débit de dose à un niveau permettant le démontage des portes de radioprotection situées entre la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole de stockage et les travaux de fermeture de l'alvéole (génie civil, scellement, remblais). Pour les alvéoles HA, l'operculaire est démonté après mise en place d'un bouchon de radioprotection qui reconstitue la protection apportée par l'operculaire.

Les écrans constitués par les hottes, les operculaires, les parois (voiles béton, hublots, portes et trappes) sont une protection physique qui a comme avantage d'empêcher les personnes d'approcher de la source de rayonnements quelle que soit l'intervention (fonctionnement normal, maintenance,

fonctionnement incidentel). Cette mesure, complétée de la mise en place de signalisation ou de dispositifs physiques (barrières…) se suffit à elle-même pour limiter l'exposition externe des personnes et du public aux valeurs de débits de dose prises en considération pour le dimensionnement des protections. Elle permet aussi de limiter le risque de contact entre les personnes et les substances radioactives en réduisant les risques liés aux facteurs humains et organisationnels.

Les conditions d'accès à l'intérieur des locaux/cellules/alvéoles contenant des colis de stockage (type cellule irradiante) seront décrites dans des procédures d'exploitation qui interdisent leur accès tant que les sources radioactives sont présentes.

Les deux autres moyens de protection (le temps et la distance) sont des mesures mises en œuvre en complément des écrans ou dans des situations particulières (intervention, incident ou accident) car elles nécessitent une information et une vigilance constante des personnes vis-à-vis des risques d'exposition externe. Dans la mesure du possible, la conception des installations du stockage évite ces moyens de protection pour les situations de fonctionnement normal. En revanche, pour certaines situations qui nécessitent des interventions à proximité de sources radioactives qui n'ont pas une protection radiologique suffisante, la distance de l'intervenant par rapport à la source et le temps d'intervention pourront être utilisés comme mesures de protection.

L'efficacité des protections mises en place au regard du risque d'irradiation du personnel et du public est contrôlée par la présence d'appareils de mesure du niveau d'irradiation qui seront positionnés à postes fixes pour mesurer l'ambiance radiologique dans toutes les zones de l'installation et plus particulièrement à proximité des zones sensibles telles que les portes, trappes… Ces moyens de mesure fixes pourront être complétés de dispositifs embarqués avec les colis de stockage pour la surveillance au cours de leur transfert.

Dimensionnement des protections contre le risque d'irradiation

En première approche afin de respecter la contrainte annuelle de dose fixée par l'Andra pour le personnel travaillant en zone nucléaire, les protections radiologiques sont dimensionnées pour obtenir un débit d'équivalent de dose (DeD) de :

- 3 µSv/h à 30 cm de la protection au niveau des postes de travail permanent (1500 h de présence/an) ;
- 15 µSv/h à 30 cm de la protection dans les locaux d'intervention (quelques heures de présence par an) sur les équipements utilisés dans des cellules contenant des substances radioactives.

A ce titre, le dimensionnement actuel des hottes de protection a été établi en se fixant une valeur de 3 µSv/h à 1 mètre pour prendre en compte la taille de son châssis et le fait d'un transport sur véhicule limitant la possibilité de s'en approcher. Au regard des limites de masses à transporter qui sont conséquentes et du diamètre des galeries (de l'ordre de huit mètres), le dimensionnement retenu pour certains colis MAVL a été adaptée à 15 µSv/h à 1 m.

Les postes de travail situés dans les locaux d'intervention sont des postes liés à des opérations ponctuelles de type interventions de maintenance préventive ou curative sur des équipements implantés en zone contrôlée dont l'accès est spécialement réglementé ou interdit. La valeur retenue de 15 µSv/h permet une flexibilité sur la durée d'exposition des personnes de manière à respecter la contrainte de dose annuelle de l'Andra. Elle permet une durée d'exposition d'environ 300 h (soit environ deux mois) pour des personnes affectées uniquement à des interventions de maintenance ou une répartition du temps d'exposition pour des personnes affectées à des postes de travail permanents et réalisant aussi des interventions.

Ces valeurs de dimensionnement permettent dans un premier temps de vérifier la faisabilité technique pour la réalisation des protections radiologiques et d'identifier les éventuelles contraintes pour leur mise en œuvre. En cas de difficulté, des mesures complémentaires (éloignement des substances radioactives par rapport aux personnes, fractionnement des substances radioactives…) pourront être envisagées d'ici la DAC.

Le dimensionnement des épaisseurs de protection est réalisé à l'aide de codes de calculs adaptés aux différents rayonnements. Les activités radiologiques prises en compte dans les modélisations correspondent aux valeurs maximales susceptibles de transiter dans les différents locaux de

l'installation. Néanmoins, si la valeur maximale revêt un caractère exceptionnel, il est possible de considérer une activité radiologique plus réaliste sous réserve de mettre en œuvre des mesures palliatives. Dans les études ultérieures, cette analyse reste à faire pour tous les colis du MID (cf. Andra 2009d) afin de préciser les conditions d'exploitation et en particulier les postes les plus dosants ; la priorité des calculs sera faite pour les colis dont l'arrivée sur le futur centre de stockage est envisagée pour les premières tranches.

Zonage de radioprotection

Le zonage de radioprotection des installations repose sur la prise en compte et l'évaluation des risques d'expositions externe et interne auxquels les opérateurs et le public sont soumis lorsque l'installation est en fonctionnement normal (cf. chapitre1).

La mise en place du zonage est une mesure de prévention qui vise à protéger les personnes et le public contre les dangers des rayonnements ionisants (exposition externe et interne) et à s'assurer du respect des limites de dose dans des conditions normales d'exploitation.

A ce stade, le zonage des installations n'est pas finalisé. Il sera établi lors des futures études de conception et présenté lors de la demande d'autorisation de création. A titre d'exemple, les premières investigations sur le zonage radioprotection des installations mènent à proposer les éléments suivants (cf. Tableau 3.4-3) :

- Les alvéoles de stockage sont des zones contrôlées interdites ;
- La cellule de manutention de la zone MAVL en présence d'un colis de stockage a un classement similaire à celui de l'alvéole de stockage ; en l'absence d'un colis de stockage dans la cellule de manutention, celle-ci est déclassée en zone réglementée simple ;
- Les galeries de transfert des colis, descenderies et puits sont classés en zone surveillée ;
- Les galeries d'accès aux alvéoles HA sont classées en zone réglementée simple.

Lors du transfert des colis, la hotte de radioprotection est une zone contrôlée spécialement réglementée ou interdite. Le périmètre de 1 mètre autour de la hotte constitue une zone contrôlée simplement réglementée.

Tableau 3.4-3 Zonage radioprotection établi sur la base de la description actuelle des installations souterraines et de leur fonctionnement

Local	Zonage radiologique	Mesures de prévention
Descenderie (transfert des hottes)	Zone surveillée (bleue)	Balisage et signalisation lumineuse des hottes chargées
Galeries de liaison principale et secondaire	Zone surveillée (bleue)	Balisage et signalisation lumineuse sur les hottes chargées
Galerie d'accès aux alvéoles de stockage MAVL	Zone surveillée (bleue)	Balisage et signalisation lumineuse sur les hottes chargées
	Zone contrôlée simple (verte) à proximité de la cellule de manutention contenant des colis y compris la hotte accostée	Balisage
Cellule de manutention des colis MAVL	Zone contrôlée simple (verte) en absence de colis	Asservissement de l'accès aux appareils de surveillance
	Zone contrôlée interdite (rouge) en présence de colis	Balisage. Accès bloquée
Alvéole de stockage MAVL	Zone contrôlée interdite (rouge)	Balisage et asservissement de l'ouverture des portes coulissantes
Galerie d'accès HA et CU3	Zone contrôlée simple (verte)	Balisage à l'accès des galeries.
Alvéole de stockage HA ou CU3	Zone contrôlée interdite (rouge)	Balisage et asservissement de l'ouverture de l'operculaire.

Evaluation dosimétrique

L'évaluation dosimétrique pour le personnel présentée pour le Dossier 2005 a été faite pour chaque type de poste de travail. Les modifications de la conception des installations et équipements ne

remettent pas en cause les conclusions de cette étude. En effet, la tendance des évolutions est plutôt favorable à une optimisation de la dosimétrie dans les installations souterraines :

- Limitation des postes de travail permanent à proximité des sources de rayonnement voire suppression par le choix de pilotage à distance lorsque l'avancement de la connaissance le permet ;
- Maintien du débit d'équivalent de dose horaire pour la conception des hottes de protection radiologique, des operculaires et parois ;
- Diminution du nombre de postes de travail associés au transfert et stockage de combustibles usés, les principaux combustibles ayant été supprimés du MID.

L'évaluation dosimétrique pour le public en limite de site n'a pas sensiblement évolué par rapport à l'évaluation conduite en 2005. La dose annuelle pour une personne du public située à 500 mètres[39] de la cheminée d'extraction d'air des installations souterraines est de l'ordre de quelques micro-sieverts comme indiqué dans le paragraphe précédent.

3.4.2.3 Risques de criticité

Origine du risque

Le risque de criticité est lié à la présence de matières fissiles dans les déchets conditionnés dans les colis qui seront accueillis sur les installations de stockage. Pour les installations « fond », seuls des colis de stockage transiteront ou seront stockés dans les alvéoles. Les colis de stockage sont spécifiques à chaque déchets HA ou MAVL (cf. chapitre 1).

- Les colis de stockage MAVL sont des conteneurs en béton. En fonction de la géométrie des colis primaires et des contraintes de conception des alvéoles de stockage, la capacité des colis de stockage est variable : de 1 colis primaire à 9 colis primaires. Les colis de stockage MAVL sont destinés à être mis en place dans une alvéole dont la section permet de placer plusieurs colis de stockage en hauteur et en largeur. A chaque colis primaire type est donc associé un colis de stockage et un aménagement en alvéole (X colis de stockage en hauteur, Y colis de stockage en largeur, Z colis de stockage en longueur).
- Le colis de stockage pour les colis primaire HA est de type enveloppe. Ce conteneur de stockage est aussi appelé « surconteneur ». Ces surconteneurs sont destinés à être mis en place dans une alvéole HA dont la section permet d'accueillir un seul surconteneur.

Les données d'entrée concernant l'inventaire en matière fissile et sa forme physico chimique ainsi que la géométrie du colis primaire sont regroupées et décrites pour chaque colis type dans le modèle d'inventaire (MID). Sur la base du MID, chaque colis type peut être associé à un milieu fissile de référence et à une géométrie de conteneur.

L'évaluation du risque de criticité sera réalisée pour l'ensemble des familles de colis déchets (masse de matière fissile par colis type) qui sont décrits dans le modèle d'inventaire, en fonction :

- De leurs localisations et des opérations de manutention associées :
  - ✓ Dans les ouvrages de transfert (liaisons surface – fond et galeries souterraines) ;
  - ✓ Dans les alvéoles de stockage ;
- De la phase de la vie de l'installation de stockage :
  - ✓ La phase d'exploitation et de réversibilité ;
  - ✓ La phase après fermeture (uniquement les alvéoles), (cf. chapitre 4) ;
- Des modes de contrôles de la criticité qui seront identifiés.

Dispositions de maîtrise du risque de criticité

Pour ce qui concerne la phase d'exploitation et de réversibilité, le risque de criticité est abordé de manière similaire à celle d'une installation nucléaire de base « classique » de surface. En effet, durant cette phase, l'intégrité des colis de stockage et des structures du stockage sont garanties. La démonstration selon laquelle la conception des installations permet d'assurer la prévention des risques

[39] La distance de 500 mètre est prise conventionnellement à ce stade des études, sans préjuger la distance qui séparera les cheminées de la clôture correspondant à l'implantation des installations de surface qui sera retenue pour la DAC.

de criticité en fonctionnement normal et incidentel sera conduite selon une approche déterministe. La démonstration de sûreté prendra en compte les principes de la règle fondamentale de sûreté I.3.c (cf. § 1.6.6 du Chapitre 1).

Pour une majorité de colis MAVL, le milieu fissile de référence est du plutonium métallique (100 % ^{239}Pu) modéré soit par de l'eau, soit du polyéthylène en fonction de la présence ou non de matière organique dans les déchets conditionnés dans le colis primaire.

Pour ce qui concerne les conditions de réflexion retenues dans les modélisations des calculs de réactivité, elles sont choisies afin d'être pénalisantes au regard de l'évaluation de la réactivité et représentatives des conditions dans lesquelles sera la matière fissile des colis de déchets.

L'analyse préliminaire des risques de criticité réalisée à ce stade du projet s'est attachée à démontrer la maîtrise des risques de criticité pour les colis de stockage durant la phase d'exploitation et de réversibilité. La démarche adoptée a consisté à identifier les colis primaire présentant un inventaire en matière fissile important et donc à « risque ». Pour la plupart de ces colis de déchets, des études en colis isolé et en situation de stockage on été menées en retenant une modélisation pénalisante au regard du risque de criticité et de la phase de vie du stockage. En effet, la réactivité d'une alvéole de stockage en phase d'exploitation et de réversibilité est moins élevée qu'après les modifications géométriques de l'alvéole inhérentes à son évolution et dégradation dans le temps (réduction des vides fonctionnels et donc rapprochements éventuels des colis de stockage et colis primaires…). C'est pourquoi la démonstration de la maîtrise de sûreté criticité, qui sera présentée dans le dossier de sûreté associé au DAC, pourra se baser notamment sur les calculs de réactivité des alvéoles effectués pour la phase après fermeture. Ainsi, les principes de modélisation suivants ont notamment été retenus :

- la longueur des alvéoles MAVL et HA est considérée comme infinie ;
- les jeux fonctionnels entre les piles de colis de stockage MAVL (de l'ordre de 10 cm) sont négligés ;
- les colis primaire MAVL sont considérés au contact ;
- les épaisseurs de béton des colis de stockage MAVL sont minimisées ;
- les colis HA sont considérés au contact (pas de colis inerte entre chaque colis HA) ;
- le milieu fissile de référence retenu est pénalisant vis à vis de la réactivité par rapport à la nature réelle des déchets contenus dans le colis primaire ;
- la quantité de matière fissile par colis primaire est maximisée. Cette hypothèse est pénalisante au regard de la variabilité des masses de matières fissiles réelles par colis primaire ;
- les conditions de réflexion retenues dans les modélisations des calculs de réactivité seront choisies afin d'être pénalisantes au regard de l'évaluation de la réactivité et représentatives des conditions dans lesquelles sera la matière fissile des colis de déchets.

Les colis identifiés comme « à risque » à ce stade du projet sont les suivants (cf. chapitre 1) :

- Le colis B5 (CSD-C) pour les déchets de catégorie MAVL ;
- Les colis standards de déchets vitrifiés (CSD-V) issus du retraitement des combustibles usés pour les déchets de catégorie HAVL ;
- Les colis CU3 pour les combustibles usés des réacteurs de recherche et de la propulsion navale.

De manière similaire, une vérification préliminaire de la maîtrise du risque de criticité pour la phase d'exploitation et de réversibilité a été effectuée pour les autres colis MAVL (la majorité en nombre de famille de colis et numériquement par rapport à l'inventaire global du stockage) qui présentent un inventaire en matière fissile moins important. Cette vérification a consisté à évaluer la réactivité en fonction des différentes géométries de colis primaires et de colis de stockage en alvéole MAVL avec une modélisation pénalisante (orthocylindre décentré, colis primaires au contact, épaisseurs de béton minimisées, optimum de modération) au regard de la phase d'exploitation.

Cette démarche (études poussées pour les colis « à risque » et études générales pour les colis « à plus faible risque ») sera reconduite pour la démonstration de la maîtrise du risque de criticité en phase d'exploitation et de réversibilité dans le rapport de sûreté joint à la demande d'autorisation de création. Elle prendra en compte les choix de conception retenus (géométries des colis de stockage,

des alvéoles…) ainsi que leurs évolutions potentielles afin de définir un domaine de fonctionnement adapté.

La maîtrise du risque de criticité en exploitation dans les installations souterraines repose sur la connaissance de la masse de matière fissile par colis primaire et la maîtrise des flux de colis (primaires ou de stockage) dans chaque unité de criticité (UC). Une unité de criticité est une unité de travail où s'appliquent un mode de contrôle et des limites de criticité en fonction du milieu fissile de référence retenu. Tout transfert de matière entre unités de criticité donnera lieu si nécessaire à des contrôles garantissant le respect des limites dans les deux UC concernées. L'Andra définira les unités de criticité et les règles de gestion de ces unités pour la DAC du stockage.

Pour les installations souterraines, les unités de criticité considérées seront, a priori, chaque alvéole de stockage MAVL et HA ou regroupement d'alvéoles. En effet, certaines familles de colis pourront remplir une alvéole complète voire plusieurs alvéoles ; ou au contraire, certaines familles de colis devront être rassemblées dans la même alvéole (co-stockage).

Les modes de contrôle pour les unités de criticité sont, a priori et majoritairement, la masse et la géométrie (colis de stockage, pas des réseaux de colis de stockage…). Pour certains déchets (déchets vitrifiés conditionnés en CSD-V), un mode de contrôle secondaire par empoisonnement pourra être retenu.

Pour ce qui concerne le mode de contrôle par la géométrie pendant la phase d'exploitation et de réversibilité dans les unités de criticité dans les installations souterraines, celle-ci sera notamment garantie par des dispositions constructives ou d'exploitation. La conception des colis de stockage qui permet de garantir les exigences suivantes :

- une barrière physique : les colis de stockage MAVL de par leur conception permettent de garantir un espacement minimal incompressible entre colis primaires pendant toutes les situations d'exploitation normales ;
- une stabilité physique : les piles de 3 colis de stockage MAVL de type pré-empilé ou de 4 colis de stockage MAVL en manutention individuelle sont stables même en cas de séismes.

A cet égard, il convient de noter que les dispositions constructives de maîtrise du risque de criticité seront favorisées par rapport à des consignes d'exploitation afin de réduire le risque lié au facteur humain. Par exemple, le pas des réseaux de stockage ou le respect du nombre de niveaux de gerbage pourront être limité mécaniquement ou physiquement (milieu souterrain restreint) et non par consigne.

Pour ce qui concerne le mode de contrôle par la masse, la caractérisation des déchets et des colis primaires est effectuée par les producteurs qui s'assurent de leurs conformités avec leurs spécifications de production. A cet égard, des contrôles seront réalisés par l'Andra afin de vérifier, par sondage, le respect des spécifications d'acceptation du stockage. Ceux-ci porteront sur les paramètres qui font l'objet des exigences de sûreté définies dans les spécifications d'acceptation (et dans l'agrément), particulièrement la masse de matière fissile par colis de déchet. L'Andra gérera chaque unité de criticité ayant un mode de contrôle par la masse sur la base de la déclaration du producteur, de l'identification des colis primaires et des colis de stockage. A cet égard, il convient de noter que compte tenu des procédés mis en œuvre et de la nature des déchets MAVL, la production de colis de déchets est rarement homogène au regard du paramètre « masse de matière fissile par colis ». Ainsi, pour les colis de déchets identifiés à risque, même si la démonstration de sûreté-criticité en phase d'exploitation, de réversibilité et à long terme permet de justifier une valeur de masse admissible de matière fissile par colis primaire, l'Andra envisage une procédure de chargement des colis qui permettra de garantir un mélange maîtrisé au niveau du colis de stockage (un colis primaire contenant beaucoup de matière fissile avec d'autres en contenant peu). Il pourra en être de même au niveau d'une alvéole de stockage entre les colis de stockage contenant plus ou moins de matières fissiles. Cette gestion permettra d'augmenter la robustesse de la démonstration et les marges de sûreté.

Par ailleurs, l'Andra identifiera dans les dossiers associés à la demande d'autorisation de création en 2014, les situations incidentelles éventuelles à prendre en compte en fonction de la conception et des règles d'exploitation des installations souterraines. Toutefois, au regard du mode de contrôle par la masse qui seront adoptés sur les installations souterraines, l'Andra mettra en place une organisation qui permettra d'exclure un dépassement de masse.

Enfin, par disposition constructive des installations souterraines, l'arrivée d'eau sur les colis sera évitée voire exclue en exploitation. Toutefois, il convient de noter que les démonstrations de sûreté criticité en situation normale et incidentelle sont établies sur la base de calculs réalisés à l'optimum de modération. Ainsi, cette option de sûreté est prise au titre des bonnes pratiques.

3.4.2.4 Risques liés aux dégagements thermiques

Origine du risque

Les dégagements thermiques ont pour origine les colis de déchets qui contiennent des substances radioactives susceptibles de dégager une puissance thermique significative. Ils concernent pour la plupart les colis HA (Déchets vitrifiés conditionnés en CSD-V) dont la puissance thermique peut varier de 2000 W par colis à la fabrication à environ 500 W par colis après une décroissance thermique de l'ordre de 60 ans. Pour les colis MAVL, leur puissance thermique est relativement faible avec des valeurs comprises entre quelques watts et une centaine de watts pour les colis les plus thermiques. Cette dernière catégorie concerne :

- Les colis primaires C1PG, contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) ou des déchets activés d'exploitation (DAE), qui présentent à l'horizon 2050 environ 40% de leur inventaire avec une puissance thermique supérieure à 90 W ; le colis de stockage comprend un colis primaire ;
- Les colis primaires CSD-C (type B5.2.1) qui ont une puissance maximale de 38,8 W/colis et la répartition suivante : 14% de ces colis ont une puissance supérieure à 20 W et 75% une puissance comprise entre 10 et 20 W. Ces colis ayant été produits entre 2002 et 2005, leur âge à réception sur le centre de stockage sera probablement de l'ordre de 20 à 30 ans, voire plus (Andra, 2009a). Les puissances thermiques auront alors fortement diminué. Les colis de stockage sont constitués de 4 ou de 8 colis primaires en fonction du débit de dose résultant qui est limité par la taille et la masse de la hotte de radioprotection.

Les risques associés à ces dégagements thermiques sont une dégradation des colis de stockage et/ou une dégradation du béton des galeries et alvéoles conduisant à la perte du confinement des substances radioactives et à une exposition radiologique du personnel.

Dispositions

Les exigences de conception retenues par l'Andra sont les suivantes :

- La température limite à ne pas dépasser pour le béton (colis de stockage MAVL et murs) est de 70°C en situation normale d'exploitation (fonctionnement permanent) et de 80 °C en situation incidentelle/accidentelle ;
- Le critère de température maximale à respecter est de 90°C au niveau de l'argilite pour garantir les caractéristiques du milieu géologique nécessaires aux besoins de la sûreté après fermeture ;
- La température ambiante de l'air dans les différentes zones des installations doit être compatible avec la présence et l'utilisation de matériel électronique (les valeurs de températures à retenir dépendent des équipements) ainsi qu'avec la présence de personnel aux différents postes de travail nécessaires à l'exploitation et la surveillance des installations.

La maîtrise des effets thermiques repose sur la conception des installations et notamment sur la densité de stockage qui est adaptée aux possibilités de dissipation par conduction dans les revêtements et l'argilite. Ainsi, les alvéoles HA et MAVL ne nécessitent pas de la ventilation pour évacuer la puissance thermique des colis de stockage.

Une des principales dispositions pour prévenir tout risque d'échauffement dans les installations de transfert et galeries est la présence de systèmes de ventilation qui permettent d'évacuer la puissance thermique des colis de stockage.

Les systèmes de ventilation sont dimensionnés afin d'assurer le refroidissement des zones à proximité des colis à fort dégagement thermique pour protéger d'une montée en température pouvant dégrader et altérer les composants du stockage (hottes de radioprotection, bétons, operculaires, dispositifs de surveillance). Ils ont aussi pour fonction la protection des travailleurs contre les risques liés aux dégagements de chaleur des déchets tels que les brûlures par contact de surfaces chaudes, le maintien d'une atmosphère de travail satisfaisante.

Au niveau des galeries d'accès, cellules de manutention MAVL et galeries de retour d'air associées aux colis de stockage les plus exothermiques, la ventilation devra permettre, si nécessaire, un refroidissement adapté aux critères de tenue des équipements électroniques, capteurs…

Concernant les galeries d'accès HA, une vérification de la température atteinte au niveau des parois de l'operculaire sera réalisée afin de prévoir un balisage et une information complémentaire aux dispositions liées à l'exposition externe des travailleurs. La nécessité de ventiler cette zone, pour réduire la température ambiante et protéger les équipements associés à la mise en place des colis et à la surveillance des galeries, dépend du choix des équipements présents et des postes de travail.

A ce stade de la conception, il est considéré que la perte des systèmes de ventilation dans chaque zone de l'installation ne conduit pas à des situations inacceptables. En effet, dans les installations de transfert (liaisons surface/fond et galeries), les colis de stockage sont transférés les uns après les autres ce qui réduit la puissance thermique à évacuer. De plus, les volumes disponibles sont suffisants pour ne pas subir une augmentation sensible de la température et l'exploitation des installations sera suspendue en l'absence du rétablissement de la ventilation.

Des dispositifs de surveillance de l'ambiance (température, hygrométrie…) et du bon fonctionnement de la ventilation équiperont les zones sensibles pouvant présenter une élévation de la température comme les galeries d'accès. La température limite de fonctionnement des capteurs installés pour la détection et la surveillance sera prise en compte pour choisir les équipements et pour dimensionner la ventilation.

En cas d'élévation anormale de la température dans les zones sensibles ou de perte de la ventilation, le personnel sera évacué et les installations mises en état sûr.

3.4.2.5 Risques liés aux dégagements de gaz de radiolyse

Origine du risque

Certains colis de déchets MAVL émettent des gaz de radiolyse depuis leur arrivée dans les installations de surface jusqu'à leur stockage en alvéole. Ces gaz ont pour origine le phénomène de radiolyse qui est lié à l'effet des rayonnements ionisants en particulier alpha émis par les substances radioactives sur les produits hydrogénés présents dans ces colis (matières organiques, eau de la matrice de conditionnement).

Ces gaz de radiolyse sont majoritairement l'hydrogène (plus de 90 % du dégagement gazeux) et, à un moindre degré, le méthane. L'émission de ces gaz peut être à l'origine d'une explosion si leurs concentrations dépassent leur limite inférieure d'explosivité (LIE[40]) en présence d'une source d'ignition.

Dans la mesure où les colis primaires et de stockage MAVL ne sont pas étanches, il est considéré que les flux de gaz se retrouvent intégralement dans l'atmosphère des locaux et zones dans lesquelles ils transitent puis sont stockés. A contrario, il est à noter que les colis HA sont étanches et ne sont donc pas concernés par cette section en l'absence de relâchement de gaz de radiolyse.

Les colis primaires présentant des dégagements de gaz de radiolyse les plus importants sont les suivants (cf. chapitre 1) :

- Les fûts contenant des enrobés bitumineux (B2.2, B2.3 et B2.5) avec un relâchement inférieur à 10 l/fût/an ;
- Les conteneurs amiante-ciment (CAC) ou en béton (CBF-C'2) contenant des déchets technologiques divers (B3.1.2) avec un relâchement de 10 l/fût/an ;
- Les fûts en acier contenant des déchets de structures métalliques cimentés (B4.1) avec un relâchement de l'ordre de 120 l/fût/an entre 2005 et 2025, de l'ordre de 20 l/fût/an à partir de 2045 ;
- Les conteneurs en béton C1PG contenant des déchets activés de déconstruction (DAD) ou des déchets activés d'exploitation (DAE), (B9) avec un relâchement de 10 l/fût/an.

[40] La LIE, concentration minimale en gaz à partir de laquelle il y a risque d'explosion, de l'hydrogène est de 4%, celle du méthane de 5%.

Les risques diffèrent selon la zone analysée. En effet, au cours de leur transfert entre les installations de surface et les alvéoles de stockage, un seul colis de stockage est transféré. Par conséquent, la quantité de gaz de radiolyse présente dans la descenderie, le puits et les galeries est très faible. Il conviendra, pour ces zones, d'analyser le risque d'explosion par accumulation d'hydrogène dans la hotte de transfert (en situation normale, incidentelle et accidentelle). Une fois mis en place dans l'alvéole de stockage, le nombre de colis de stockage croit et la quantité de gaz de radiolyse relâchée au sein de l'alvéole est plus importante.

Résultats de l'analyse préliminaire

L'étude préliminaire du risque d'explosion associé au relâchement de gaz de radiolyse a considéré que les gaz émis par les colis de stockage sont de l'hydrogène. Ainsi, l'évaluation couvre la présence d'autres gaz de radiolyse (cf. note de bas de page sur la LIE). Elle a montré que les installations de transfert surface/fond et souterraines présentent un risque d'explosion maîtrisé sous réserve de la mise en œuvre de dispositions techniques et organisationnelles. Elle a permis d'identifier :

- Les zones/locaux qui présentent des situations pour lesquelles l'atteinte de la LIE est possible ;
- Les moyens de maîtrise permettant de réduire voire supprimer les zones explosives ;
- Les sources d'inflammation pouvant conduire à une explosion en vue de limiter ou supprimer leur présence.

Les principales hypothèses considérées pour l'analyse sont présentées ci-après :

- Les colis de stockage émettent un dégagement continu d'hydrogène ; celui-ci diminue dans le temps. Les valeurs retenues pour l'analyse sont des valeurs moyennes dans les alvéoles de stockage prises égales à 10 l/fût/an et des valeurs maximales théoriques dans les zones de transfert des colis dans les hottes ;
- Les systèmes de ventilation permettent d'évacuer l'hydrogène ;
- En l'absence de ventilation, l'hydrogène se répartit de manière homogène dans le volume libre disponible de la zone considérée.

Les principales conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- Pendant le transfert, la quantité de gaz de radiolyse est faible et la concentration est très inférieure à la LIE dans les galeries même en l'absence de la ventilation en raison du volume libre important dans ces zones ; la hotte de transfert n'est pas considérée étanche aux gaz ce qui permet d'écarter les risques d'accumulation dans son volume interne.
- La maîtrise du risque d'explosion dans les alvéoles MAVL repose sur la présence d'une ventilation qui maintient le taux d'hydrogène à des valeurs très inférieures à la LIE (fraction de la LIE de l'ordre de 10^{-6}).
- Les délais disponibles pour rétablir la ventilation en cas d'un arrêt de ventilation avant d'atteindre le critère (cf. chapitre 1) de 1% d'hydrogène dans l'alvéole sont variables en fonction du type de colis (taux de relâchement d'hydrogène) et du type d'alvéole (nombre de colis par alvéole et volume libre dans l'alvéole). Une évaluation a été effectuée pour une valeur moyenne de 10 l/fût/an et sous l'hypothèse pénalisante que l'hydrogène ne se répartissait pas uniformément mais seulement dans le volume libre en toit d'alvéole ; dans ces conditions, le délai disponible est de l'ordre de 10 jours. Une autre estimation a été réalisée pour une alvéole de colis B4.1 relâchant 100 l/fût/an, toujours sous l'hypothèse d'une stratification de l'hydrogène en toit d'alvéole (la prise en compte d'une stratification dans un volume libre réduit permet d'augmenter les marges de la démonstration de sûreté) ; ces hypothèses abaissent le délai disponible à une valeur inférieure à 6 jours (le faible écart s'explique par un nombre de colis par alvéole inférieur et un volume libre plus important). Les délais d'intervention nécessaires ne peuvent se quantifier qu'en rapport à des situations qui restent à définir, mais il est concevable qu'ils se chiffrent en jours. Ce point est donc à analyser en détail dans le cadre des analyses de risques.
- Deux situations nécessitent d'être approfondies au regard du risque d'explosion :
  - ✓ Une explosion à l'intérieur du colis de stockage ;
  - ✓ Une explosion au sein de l'alvéole de stockage en l'absence de ventilation (panne de la ventilation en exploitation, arrêt volontaire de la ventilation lors des opérations de fermeture des alvéoles de stockage, explosion après fermeture notamment lors d'un retour éventuel dans le cadre d'une demande de réversibilité).

Dispositions

Les dispositions à retenir pour la conception des installations au regard de l'analyse réalisée ont pour objectifs :

- de prévenir la formation d'atmosphères explosives (ATEX) ;
- d'éviter l'inflammation d'ATEX et atténuer les effets d'une explosion.

En premier lieu, la prévention de l'apparition d'une atmosphère explosive passe par la limitation de la quantité d'hydrogène issue des colis de stockage au moment de leur mise en alvéole. En complément de la réduction à la source effectuée par les producteurs (tri des déchets, modes de conditionnements), un entreposage préalable de certains colis peut être envisagé avant leur transfert en stockage. L'exemple du colis B4.1 montre que le taux d'hydrogène rejeté des colis diminue d'un facteur 6 en attendant environ 40 ans.

Afin de maîtriser ce risque, l'acceptation des colis en stockage sera conditionnée par la connaissance du taux de relâchement en gaz de radiolyse des colis primaires, cette limite pouvant être fixée à 10 l/fût/an (valeur maximale moyenne pour un lot de colis primaires de volume unitaire de l'ordre de 200 litres). Avec cette valeur, les délais d'intervention en cas d'absence de ventilation sont compatibles avec un niveau de risque résiduel acceptable.

La prévention de la formation d'atmosphères explosives repose donc sur la présence d'un système de ventilation adapté, c'est-à-dire disponible et fiable ; la conception des installations et gaines ne favorise pas la présence de zones mortes. La conception devra prendre en compte la redondance de certains équipements en limitant autant que possible les modes communs de défaillance (alimentation électrique, ventilateurs…). L'évolution de la conception des alvéoles MAVL a conduit à proposer des alvéoles passantes qui favorisent l'atteinte de ces exigences de sûreté :

- suppression du mode commun d'absence simultanée de l'entrée et de la sortie d'air de la ventilation suite à un effondrement par exemple ou à une absence d'alimentation électrique ;
- accès facilité voire possible pour maintenance des gaines et composants des systèmes de ventilation ;
- possibilité de placer des dispositifs de mesures de type explosimétrie ou plus perfectionnés (analyse de l'air par Chromatographie Phase Gazeuse (CPG)…) en sortie d'alvéoles au niveau de l'extraction d'air.

Dans tous les cas, les études ultérieures devront vérifier que les délais d'intervention pour remettre en service la ventilation sont compatibles avec les délais disponibles pour juger la situation comme acceptable, pour tous les types de colis présents dans l'inventaire. Au stade actuel, un délai de plusieurs jours pour intervenir et remettre en service les systèmes de ventilation associés à ces alvéoles semble le plus vraisemblable. Lors des études futures et en vue de la DAC, les délais pour réaliser une intervention importante dans un milieu confiné difficile d'accès sont à estimer pour différents scénarios dégradés afin d'être en mesure de se prononcer sur leur compatibilité avec la maîtrise du risque d'explosion.

Au cours du transfert en hotte, la formation d'une zone explosive à l'intérieur de la hotte est prévenue par conception au travers des jeux de construction des portes et éventuellement de la présence d'un évent en partie haute. L'hydrogène rejeté est dilué par les flux de ventilation circulant dans les installations de transfert.

La surveillance des installations est réalisée afin de vérifier le bon fonctionnement de la ventilation (débit de ventilation) et le taux d'hydrogène notamment en sortie des alvéoles. Les seuils de concentration maximale en hydrogène pour être conforme à la réglementation sont rappelés dans le chapitre 1.

A titre d'illustration, son application aux installations conduit à limiter la concentration en hydrogène dans :

- les galeries de transfert et d'accès à 10% de la LIE soit 0,4% ;
- les alvéoles MAVL à 25% de la LIE soit 1% ;

- la cellule de manutention à 10% de la LIE lorsque du personnel entre pour une intervention de maintenance soit 0,4%.

Les capteurs seront réglés pour déclencher à des valeurs inférieures à la réglementation afin de disposer de marges permettant l'arrêt de l'exploitation, la mise en sûreté de l'installation et l'évacuation du personnel.

La surveillance du débit de ventilation et des défauts des systèmes de ventilation va permettre d'asservir le fonctionnement des véhicules de transfert et des équipements de manutention au fonctionnement de la ventilation. En l'absence d'un débit de ventilation suffisant, l'exploitation de l'installation sera arrêtée. Cette mesure organisationnelle est retenue afin de supprimer les sources d'inflammation au niveau des alvéoles de stockage MAVL et s'affranchir d'un dimensionnement ATEX des équipements et engins utilisés dans le milieu souterrain.

La nécessité de dispositions de protection ou de limitation des conséquences d'une explosion a été analysée, au titre de la défense en profondeur, en considérant que les dispositions de prévention et de surveillance retenues étaient défaillantes. L'évaluation des conséquences d'une explosion au sein d'un colis de stockage et au sein de l'alvéole a été réalisée pour identifier son effet potentiel sur la tenue mécanique des composants sollicités.

Evaluation des conséquences

Les calculs réalisés ont retenus des hypothèses très enveloppes sans lien avec des situations réelles au regard de la très faible quantité d'hydrogène relâchée par les colis.

L'évaluation de l'endommagement d'un colis suite à une explosion interne au colis de stockage a retenu les hypothèses suivantes :

- Les vides internes (colis de stockage, colis primaire) sont remplis d'un mélange air/hydrogène aux proportions stœchiométriques ;
- Le point d'ignition est positionné pour maximiser la surpression ;
- L'amortissement de l'explosion lié à la présence de l'enveloppe du colis primaire n'est pas considéré.

Globalement, lorsque l'explosion s'initie à l'intérieur de la cavité close du fût primaire, au sommet du déchet, elle ne génère pas de dégâts importants sur la structure du colis primaire, mais le risque de dessertissage du bouchon est important.

Concernant l'explosion au sein du colis de stockage, le béton du colis est fissuré tandis que la déformation des armatures reste en deçà des limites de rupture. Aucune présence de fissures traversantes sur les parois du stockage n'est constatée ; il n'y a pas ruine du conteneur.

L'évaluation d'une explosion au sein de l'alvéole de stockage a été réalisée en considérant :

- Une quantité d'hydrogène correspondant à la production de l'ensemble des colis d'une alvéole pleine après un arrêt de ventilation de 30 jours ;
- Une concentration de cette quantité d'hydrogène dans un nuage théorique sphérique air/hydrogène aux proportions stœchiométriques ;
- Une localisation de l'explosion afin de maximiser l'endommagement.

Dans ce cadre, l'étude montre que :

- les colis de stockage ne sont que faiblement endommagés (pas d'atteinte du colis primaire, le colis de stockage est intègre) ;
- le déplacement relatif des colis d'une pile n'est pas suffisant pour provoquer une chute de colis ;
- deux piles de colis successives peuvent être en contact ;
- la structure des panneaux coulissants assurant la protection radiologique de la cellule de manutention n'est pas endommagée.

Au regard de ces évaluations, la conception des colis et des alvéoles ne nécessite pas la mise en œuvre de dispositions complémentaires pour limiter les conséquences d'une explosion.

Fermeture des alvéoles MAVL

En dehors des situations incidentelles ou accidentelles qui peuvent être à l'origine d'une perte de la ventilation, certaines situations normales de fonctionnement seront réalisées après arrêt délibéré de la ventilation. C'est le cas :

- des opérations de fermeture des alvéoles qui prévoient un arrêt volontaire de la ventilation ;
- de l'alvéole fermée ;
- de l'alvéole lors de son ouverture dans le cadre d'une demande de retrait des colis (demande de réversibilité).

Pour chacune de ces situations, la possibilité d'une formation d'atmosphères explosives est à limiter autant que possible. Pour cela, différentes solutions ont été analysées et pourraient être retenues en fonction des situations :

- l'inertage de la zone en remplaçant le comburant (oxygène) par un gaz inerte (azote[41]) ;
- la recombinaison catalytique de l'hydrogène avec l'oxygène avant d'atteindre la zone d'inflammabilité du mélange ;
- la consommation chimique de l'hydrogène au moyen de composés (oxydes métalliques, composés organiques et polymères) susceptibles de former des liaisons avec l'hydrogène en faible teneur dans l'atmosphère.

La durée des opérations de fermeture des alvéoles peut conduire à une formation d'atmosphères explosives au sein de l'alvéole en raison de l'arrêt de la ventilation. Cette situation présente un risque d'explosion qui pourrait endommager les équipements et blesser le personnel en charge de ces opérations. Une solution envisagée est de prévoir l'inertage de l'alvéole pendant ces opérations permettant ainsi de s'affranchir :

- d'une explosion ;
- d'une possibilité de création d'atmosphères explosives après la fermeture de l'alvéole.

Ces opérations se déroulent en trois étapes :

- Isolement de la zone utile par des murs maçonnés étanches (en fond et en tête) équipés de gaines d'injection et d'extraction de l'azote ; purge de l'atmosphère par injection d'azote pour abaisser le taux d'oxygène à 2,25% ;
- Fermeture puis démontage de la conduite d'extraction du mur aval ; un système de régulation permet de réinjecter de l'azote pour compenser les fuites et maintenir l'alvéole en légère surpression ;
- Fermeture puis démontage de la conduite d'extraction du mur amont ; les travaux de génie civil pour le scellement de l'alvéole sont réalisés sous ventilation normale.

La Figure 3.4-2 illustre l'alvéole après la mise en place du massif d'appui en béton.

[41] Les dangers associés à la manipulation de l'azote dans un milieu confiné, notamment le risque d'anoxie pour le personnel, seront évalués au cours des études détaillées.

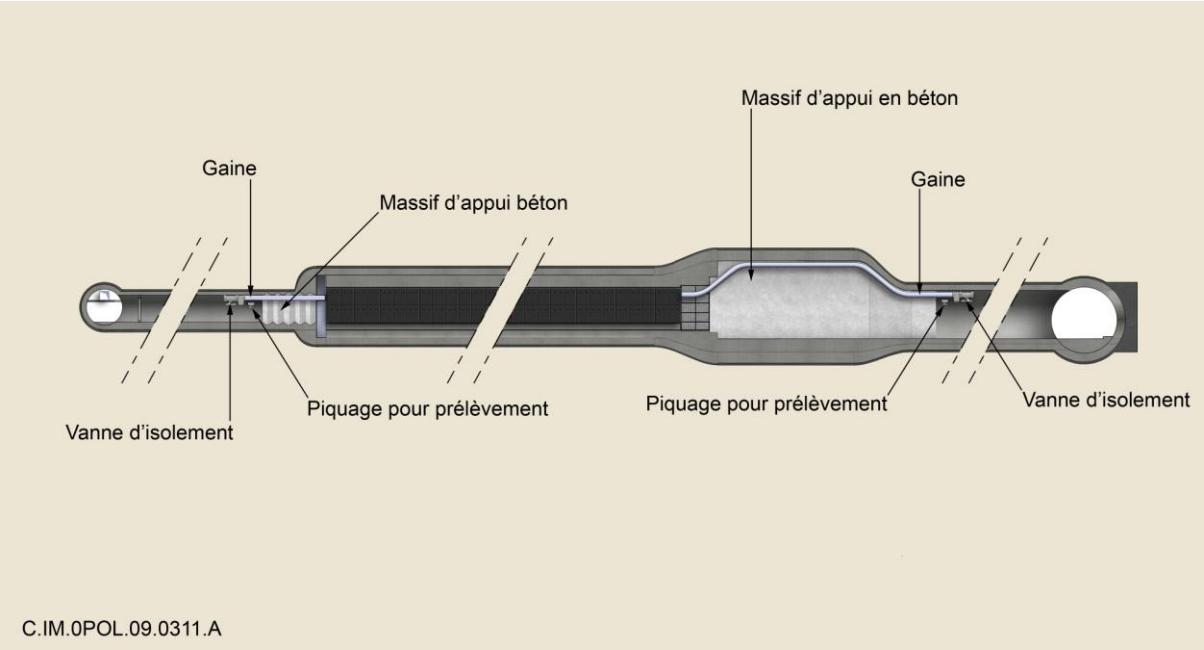


Figure 3.4-2 Fermeture de l'alvéole MAVL, mise en place du massif d'appui

Il faut noter que les risques d'exposition externe au cours de ces opérations sont pris en compte et maîtrisés par la présence d'un écran de protection (cf. Figure 3.4-3) constitué soit d'une rangée de blocs de radioprotection pour la zone amont (en remplacement des portes de radioprotection séparant la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole), soit du mur séparant la partie utile de l'alvéole et le local de filtration pour la zone située en aval.

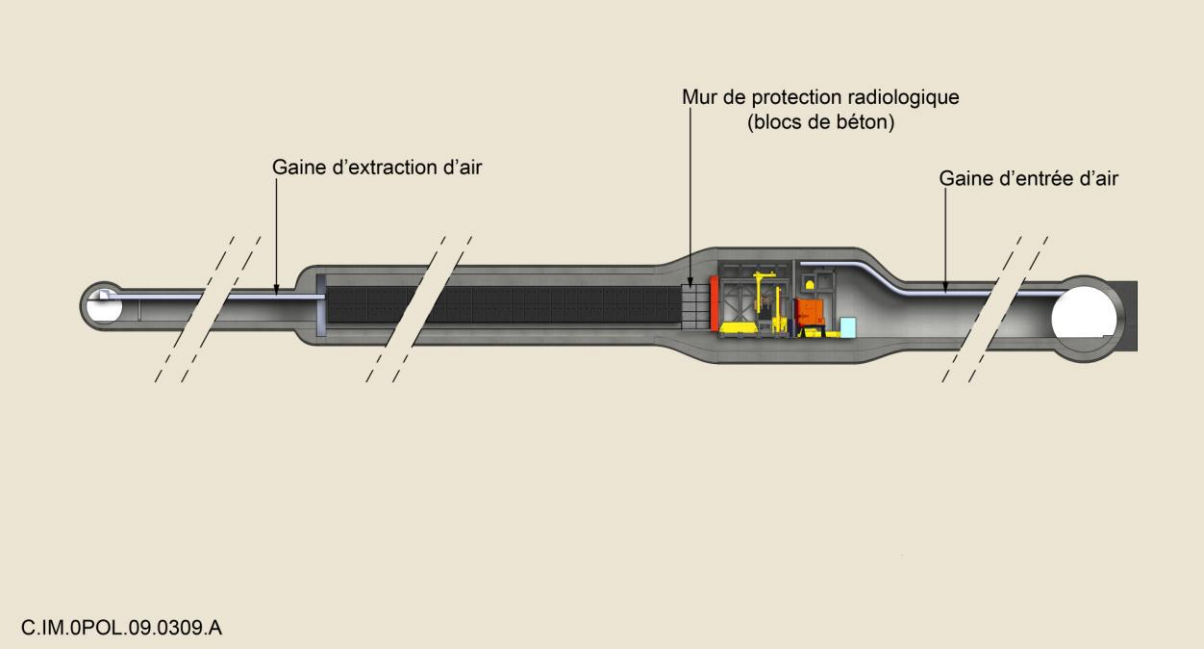


Figure 3.4-3 Fermeture de l'alvéole MAVL, mise en place du mur de protection radiologique

Les risques d'explosion associés à la fermeture de l'alvéole sont maîtrisés au regard des dispositions précédentes. Il conviendra dans les études ultérieures d'analyser précisément les dangers associés au système d'inertage notamment pour le personnel et de prendre les éventuelles dispositions complémentaires adaptées.

La fermeture de l'alvéole dans ces conditions permet de limiter les risques d'explosion pendant la phase après fermeture, l'atmosphère présente ne contenant que très peu d'oxygène. Ainsi, une situation d'explosion dans l'alvéole durant cette période a une occurrence très faible. Ses conséquences sont également faibles comme l'indique le paragraphe précédent relatif à l'évaluation des conséquences.

Le dernier point à analyser est le retour dans une alvéole scellée dans le cadre d'une demande de réversibilité. Les opérations à réaliser lors des phases de réouverture passent d'abord par l'élimination de la surpression et le rétablissement d'une atmosphère saine à l'intérieur de la zone à rouvrir en s'assurant de l'absence d'inflammation par contact avec l'air ambiant. L'état de pression à l'intérieur de l'alvéole peut atteindre jusqu'à 10 fois la pression atmosphérique 100 ans après sa fermeture durant lesquels chaque colis aura dégagé 10 litres d'hydrogène par an.

Deux méthodologies de réouverture ont été envisagées :

- par enlèvement des remblais et scellement de la galerie d'accès ;
- par creusement d'une galerie spécifique.

Parmi ces deux méthodes, celle qui est privilégiée consiste à creuser une galerie spécifique car la présence des bouchons de béton de haute performance qui sont à retirer dans la première méthode pourrait s'avérer très difficile et l'état des ouvrages (soutènement et revêtement) incertain. D'autres solutions sont à étudier pour la réouverture des alvéoles.

La préparation de la réouverture fera l'objet d'un mode opératoire pour décompresser et purger l'atmosphère de l'alvéole. Ce mode opératoire prévoira les dispositions de sécurité pour rouvrir une alvéole en atmosphère potentiellement explosive et retirer les colis.

3.4.3 Risques non nucléaires d'origine interne

3.4.3.1 Risque d'incendie

Le risque incendie dans les installations souterraines est un enjeu majeur de par son caractère dimensionnant des équipements et structures et de l'architecture du stockage.

Sa maîtrise repose sur la mise en œuvre d'une démarche de conception incluant l'optimisation des installations et équipements au travers de l'application des textes réglementaires en vigueur pour des installations nucléaires. Il s'agit pour l'essentiel de l'arrêté du 31 décembre 1999 et de son arrêté modificatif du 31 janvier 2006, fixant la réglementation technique générale destinée à prévenir et limiter les nuisances et les risques externes résultant de l'exploitation des installations nucléaires de base, du guide DGSNR relatif à l'application de l'arrêté du 31/12/99 – thème : Incendie et de la Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) I.4.a - relative à la protection contre l'incendie.

Une première analyse de ces textes a été réalisée en vue de dégager les principales dispositions de conception des installations et équipements du stockage. L'analyse s'est focalisée sur les zones « nucléaires » des installations souterraines, l'incendie dans les zones en construction est abordé succinctement dans la section 3.4.3.9. L'analyse du risque d'incendie sera reprise de façon détaillée dans une phase ultérieure (post-Jalon 2009, notamment lorsque les architectures et équipements des installations seront mieux définis). Au stade actuel, les grands principes adoptés pour maîtriser le risque d'incendie dans la zone « nucléaire » sont présentés.

<u>Résultats de l'analyse préliminaire</u>

L'étude préliminaire des risques d'incendie a montré que les installations de transfert surface/fond et souterraines présentent un risque d'incendie maîtrisé sous réserve de la mise en œuvre de dispositions techniques et organisationnelles. Elle a permis d'identifier :

- Les zones/locaux qui présentent des situations d'incendie susceptibles de contaminer les installations et de relâcher des substances radioactives dans l'environnement : les installations de transfert des colis MAVL et les alvéoles de stockage MAVL ;
- La zone centrale qui rassemble les activités qui peuvent générer les incendies les plus importants ;

- Les concepts descenderie funiculaire et puits qui présentent une sensibilité au départ de feu faible par conception ;
- Les zones qui présentent des situations d'incendie mais sans conséquences radiologiques : la zone HA pour laquelle des dispositions similaires à celles retenues pour la conception de la zone MAVL seront appliquées à la conception des véhicules, navettes et équipements.

Ces zones à risques sont identifiées par un cercle rouge sur la Figure 3.4-4 ci-dessous. Les zones HA équivalentes ne sont pas identifiées dans la mesure où le contenu des colis de stockage HA n'est pas mobilisable en situation d'incendie.

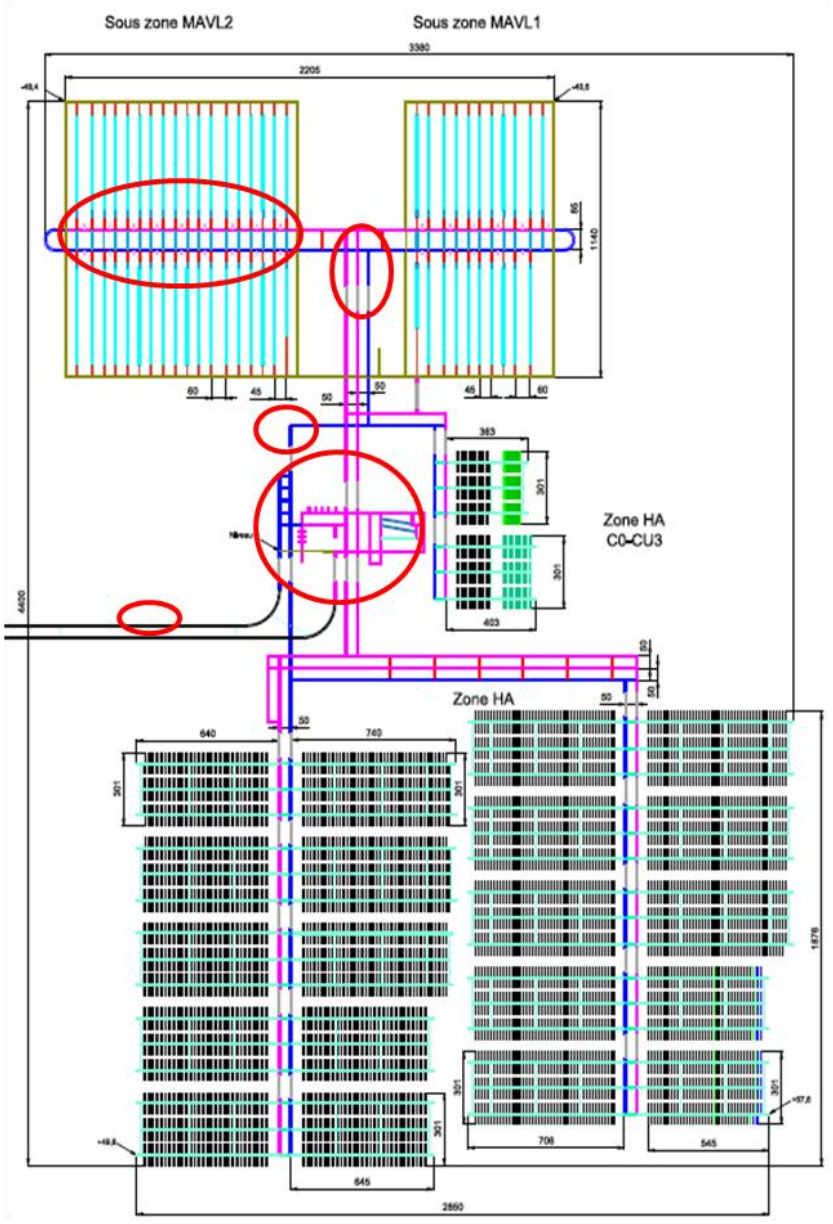


Figure 3.4-4 Illustration des zones présentant un risque d'incendie élevé

Les différents locaux/zones de l'installation ont été hiérarchisés afin d'approfondir la conception des zones pour lesquelles les dangers associés à un incendie sont les plus importants. Cependant, pour l'ensemble des zones étudiées, des mesures de maîtrise des risques sont à mettre en œuvre, celles-ci étant proposées en appliquant les trois premiers niveaux de la démarche de défense en profondeur à l'incendie :

- Le premier niveau consiste à proposer des mesures de prévention adaptées au niveau de risque, celles-ci étant destinées à empêcher l'incident de se produire. Cela se traduit par le contrôle de l'apparition des départs de feu au travers de contraintes de conception au niveau des composants du triangle du feu. Au stade de l'exploitation, il s'agit de s'assurer de l'évolution des charges calorifiques et des sources d'ignition.
- Le deuxième niveau consiste à définir des moyens de mesure pour s'assurer que le système reste dans son domaine normal de fonctionnement. Cela se traduit par la surveillance des installations et équipements et la détection des départs de feu en vue de maîtriser le développement d'un feu.
- Le troisième niveau consiste à postuler que l'incident se produit néanmoins, et à définir les mesures de protection destinées à réduire sa gravité ou à revenir vers un fonctionnement normal. Ces mesures participent à la maîtrise de la propagation de l'incendie au travers notamment de moyens d'extinction et d'intervention ou de mise en place d'une sectorisation.

Les dispositions de prévention, de détection et de surveillance, ainsi que celles de limitation des conséquences permettent de dégager les principales options de sûreté à retenir pour les futures études de conception.

Mesures préventives

Une stratégie de diminution de l'occurrence des départs de feu est définie dès la conception en cherchant à limiter voire éliminer les produits combustibles et inflammables, en favorisant la meilleure qualification de réaction au feu des matériaux et réduisant autant que possible les sources d'allumage potentielles dans les installations.

Il sera retenu des matériaux de classe M0 pour les structures, M1 ou M2 pour les équipements, C1 pour les câbles électriques, CR1 pour la détection incendie.

Les charges calorifiques des équipements et installations seront limitées autant que possible en substituant par exemple la motorisation diesel des véhicules, navettes et équipements par une motorisation électrique ou l'utilisation d'huiles par des fluides non combustibles.

La conception des galeries devra permettre leur résistance au feu pour ne pas aggraver les situations d'incendie envisagées.

La conception des architectures et les modes d'exploitation des installations interdisent, dans la mesure du possible, un croisement de véhicules et des navettes. Un éloignement suffisant des véhicules, navettes et équipements les uns des autres sera prévu pour ne pas concentrer des charges calorifiques dans des zones de l'installation et limiter la propagation de l'incendie.

Les gaines de ventilation sont conçues pour résister à un incendie et ne pas être un vecteur de propagation de l'incendie.

Toutes les dispositions pour limiter la contamination (dispersion de substances radioactives dans l'air ou dans les effluents) des installations et de l'environnement en situation d'incendie doivent être mises en œuvre.

Mesures de détection/surveillance

La surveillance des installations est réalisée par des dispositifs de détection incendie de type adressable, permettant de détecter et de localiser tout départ de feu, d'avertir le personnel du danger et de déclencher les actions d'évacuation des personnes, d'intervention des moyens de secours et de pilotage de la ventilation (désenfumage). Cette détection rapide permet une alarme précoce et facilite l'intervention dans les galeries.

Des systèmes de détection embarqués sont installés sur les véhicules de transfert, navettes et équipements de manutention pour détecter au plus tôt un départ de feu. A ce système est associée une extinction automatique embarquée adaptée au feu susceptible de se déclarer.

Les détections sont reportées dans la salle de commande dédiée au suivi de ces transferts ainsi qu'au poste de commande centralisé de l'installation. Concernant les détections présentes sur les véhicules et navettes, elles entraînent un défaut au niveau du véhicule ou de la navette qui est reporté en salle de commande et au poste de commande centralisé.

Mesures de protection et de limitation des conséquences

En cas d'incendie, la maîtrise de sa propagation passe par les propriétés des matériels et équipements utilisés. A titre d'exemple, les câbles électriques seront de type C1 pour limiter la propagation de l'incendie par leur intermédiaire. Elle dépend aussi des moyens d'intervention matériels et humains qui sont prévus pour maîtriser et contenir un feu en attendant l'arrivée de secours extérieurs.

La structure-porteuse des installations du fond est conçue pour rester stable au feu 2 heures et n'être que faiblement altérée par un incendie.

L'incendie étant associé essentiellement à la présence de véhicules de transfert et de navettes, leur éloignement suffisant les uns des autres doit être maintenu pour limiter les risques de propagation d'un incendie de l'un vers l'autre. Cette disposition concerne notamment les intersections de galeries ainsi que les zones de transbordement de la hotte entre les galeries de transfert et les galeries d'accostage ou d'accès.

La non-propagation de l'incendie d'une galerie aux galeries adjacentes est basée sur la mise en œuvre de dispositions constructives permettant de garantir le confinement du feu dans la zone sinistrée. Ces dispositions constructives sont détaillées ci-après :

- Barrages de ventilation : Chaque intersection de galeries possède des sas et barrages de ventilation (cf. Figure 3.4-5) empêchant la propagation des fumées. Ces éléments sont commandés automatiquement dès la détection d'un départ de feu.
- Ventilation : Dès qu'un départ de feu est détecté en galerie, le système de désenfumage est mis en marche. Le débit d'extraction est augmenté dans la zone concernée. Les trappes d'extraction sont ouvertes. Dans le cas d'un incendie en alvéole MAVL, la ventilation est arrêtée progressivement et les clapets coupe feu actionnés. Une sectorisation de cette zone est envisagée.
- Dispositifs automatiques d'extinction : La mise en place de dispositifs d'extinction embarqués sur les véhicules, navettes et équipements de manutention permet d'intervenir rapidement sur un départ de feu.
- Equipements mobiles de protection incendie : Dans les zones où la présence du personnel est importante, des extincteurs sont mis à disposition pour agir rapidement sur un feu naissant.

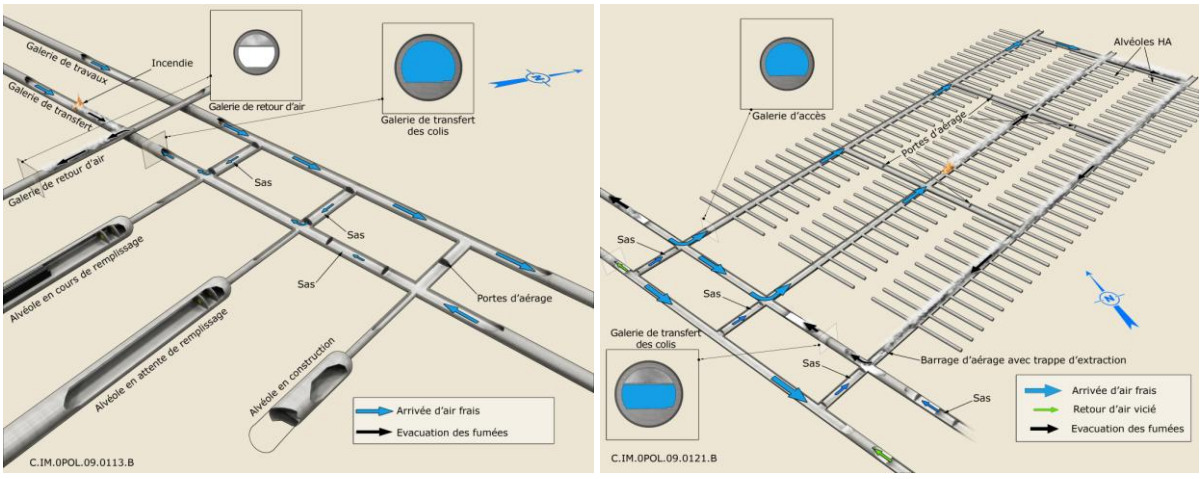


Figure 3.4-5 *Incendie dans une galerie de transfert MAVL (à gauche) et Incendie dans une galerie d'accès HA (à droite)*

Les moyens de lutte et d'intervention participent ensuite à la non propagation de l'incendie et la limitation des conséquences. Compte tenu de la difficulté de gestion des effluents dans les galeries, les dispositifs d'extinctions seront choisis préférentiellement parmi ceux générant le moins d'effluents (mousse, poudre…). L'efficacité de l'intervention est un principe retenu à ce stade pour limiter la propagation de l'incendie. Celle-ci peut être atteinte au travers de l'existence de consignes générales et spécifiques d'intervention précisant la conduite à tenir (alerte, gestion de ventilation…), d'une organisation permettant la première intervention (confirmation du feu…) et l'extinction en collaboration avec les secours externes (deuxième intervention) et de la formation du personnel aux missions d'intervention.

En situation d'incendie, il convient aussi de protéger les cibles présentes dans les installations :

- Le personnel présent dans l'installation doit pouvoir évacuer par la mise en place de circuits d'évacuation permettant d'assurer la sécurité des personnes. Ces circuits peuvent servir d'accès aux équipes d'intervention. Ils doivent être protégés contre les effets d'un incendie : personnes mises à l'abri des aérosols radioactifs, des fumées, des rayonnements thermiques et d'une irradiation directe pouvant résulter d'un éventuel endommagement des protections radiologiques.
- Les équipements nécessaires à la mise et au maintien à l'état sûr des installations ne doivent pas être atteints de façon directe ou indirecte par l'incendie. A ce stade du projet, ces équipements ne sont pas définis. A titre d'exemple :
  - ✓ la tenue au feu des murs, structures et galeries sera supérieure à 2 heures pour l'évacuation du personnel, l'accès des secours et la protection des équipements sensibles ;
  - ✓ les équipements de sûreté et de sécurité seront secourus électriquement ou leur alimentation électrique séparée sans mode commun de défaillance ;
  - ✓ les colis de stockage sont protégés des effets de l'incendie jusqu'à leur mise en alvéole par leur transfert en hotte dont la fonction principale est la radioprotection du personnel et pour laquelle une fonction de protection du colis contre les effets d'un incendie est attribuée.
- Les colis de stockage qui transitent dans les installations souterraines doivent être protégés des effets d'un incendie. Comme indiqué ci-avant, en transfert jusqu'à l'alvéole, ils sont protégés par la hotte de transfert. Lors de leur mise en alvéole, les colis sont extraits de la hotte. Pour les colis HA, la seule disposition prévue est la limitation de la charge calorifique du système de poussée présent dans l'alvéole à proximité du colis. Pour les colis MAVL, ils sont préparés dans la cellule de manutention puis transférés dans la partie utile de l'alvéole à leur position de stockage. Au cours de ces étapes, des dispositions complémentaires visant à limiter la durée, la propagation et les effets d'un incendie sont prévues comme :
  - ✓ des systèmes de détection et d'extinction automatique dans la cellule de manutention ;
  - ✓ des systèmes de détection/extinction embarqués sur les équipements (chariots et pont) mobiles utilisés dans l'alvéole ;
  - ✓ des écrans de protection mis en place entre les colis et les zones potentielles de développement d'un incendie.

Enfin, les impacts à l'environnement lors d'une situation d'incendie doivent être limités autant que possible. La maîtrise des relâchements potentiels passent notamment par la limitation de la quantité d'effluents liquides issus de la lutte contre l'incendie et par la filtration des substances radioactives éventuellement remises en suspension. La limitation de la quantité d'effluents nécessite le choix de systèmes d'extinction créant peu ou pas d'effluents. Concernant l'impact associé au rejet de substances radioactives dans l'environnement, tout relâchement non contrôlé dans l'environnement est interdit quel que soit l'emplacement de l'incendie. En fonction des zones étudiées, il peut être envisagé soit la mise en place d'un système de filtration (il fonctionne tant que la température n'endommage pas les filtres), soit l'arrêt de la ventilation en vue d'un confinement statique.

Scénarios envisagés et perspectives d'optimisation

Les scénarios de dimensionnement des équipements et des installations sont :

- un incendie du véhicule de transfert ou navette (cf. Figure 3.4-6) impliquant la hotte et son colis de stockage lors de son transfert entre la surface et la tête des alvéoles de stockage, celui-ci étant considéré suite à une collision ;
- un incendie d'un équipement de manutention impliquant un colis (ou une pile de colis) de stockage MAVL lors de leur positionnement en alvéole de stockage (cf. Figure 3.4-7).

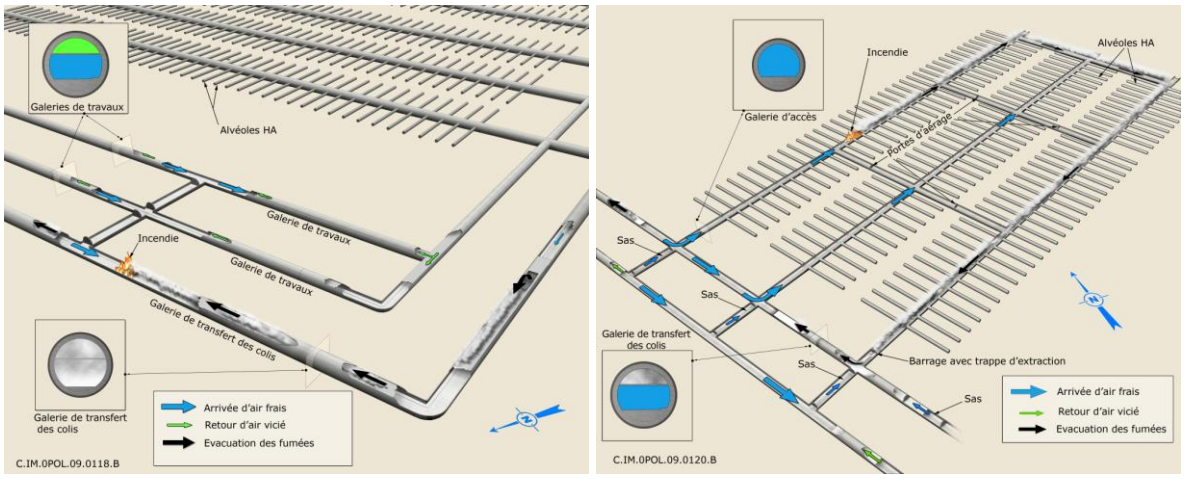


Figure 3.4-6 *Incendie d'un véhicule de transfert dans la galerie de transfert HA (à gauche) et Incendie de la navette de transfert dans une galerie d'accès (à droite)*

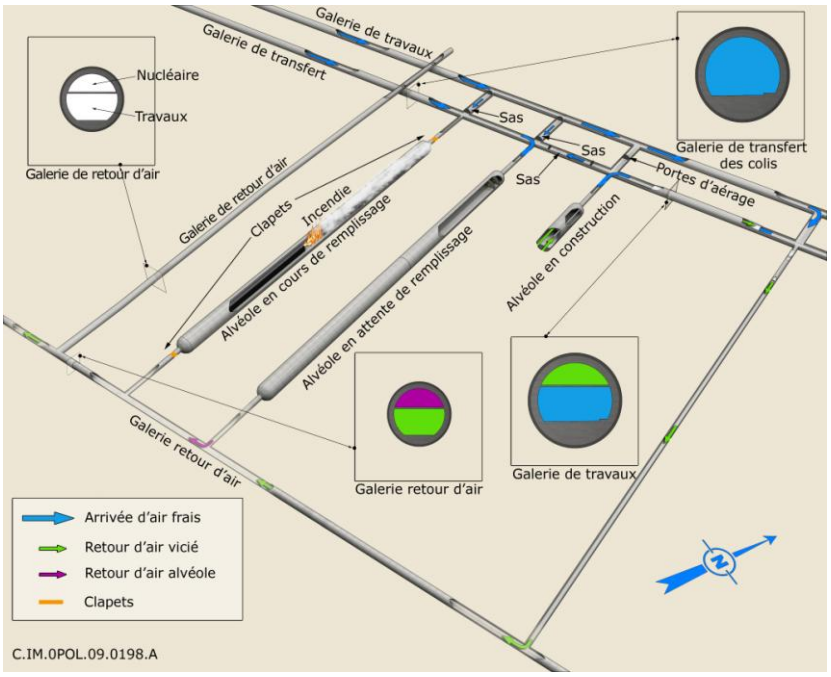


Figure 3.4-7 *Incendie dans une alvéole de stockage MAVL*

La prise en compte de ces scénarios conduit à une optimisation des véhicules, navettes et équipements pour réduire l'occurrence et la gravité de l'incendie : réduction de la charge calorifique, optimisation de l'emplacement des éléments contribuant à l'incendie pour limiter l'agression des colis, fiabilisation des systèmes de détection/extinction embarqués.

Le premier scénario présente un caractère dimensionnant de la hotte de transfert qui devra résister à l'impact d'une collision pour considérer la protection du colis pendant l'incendie ; le système de détection/extinction embarqué est aussi à dimensionner en conséquence pour intervenir dans la démonstration de sûreté.

Les incertitudes sur les résultats des simulations thermiques impliquant l'incendie d'un véhicule transportant un colis de stockage d'enrobés bitumineux, ne permettent pas à ce stade de s'affranchir du risque de relâchements radioactifs en situation d'incendie.

L'Andra cherchera à partir de 2010 à réduire les incertitudes sur les résultats des simulations thermiques au travers d'une meilleure connaissance des situations d'incendie. Cela se fonde sur la

poursuite des études de conception des véhicules, navettes et équipements, voire sur des essais ciblés qui seront définis en fonction des besoins (incendie de colis, essais des systèmes de détection/extinction embarqués...).

Sur la base des connaissances acquises lors du dépôt de la DAC, les scénarios d'incendie envisagés pourront être écartés ce qui permettrait d'exclure un relâchement de substances radioactives et ne plus considérer ces situations pour le dimensionnement de la ventilation nucléaire.

Par ailleurs, d'autres perspectives d'amélioration des dispositions disponibles feront l'objet d'un programme de recherche et développement sur les thématiques associées à l'incendie. A titre d'exemple, les thèmes abordés concerneront le pilotage de la ventilation, les moyens d'extinction utilisant le minimum d'eau.

3.4.3.2 Risque lié aux opérations de manutention

Le risque lié aux opérations de manutention des colis de stockage HA et MAVL (transfert depuis la surface dans une hotte de radioprotection jusqu'à leur stockage en alvéole) peut générer un dimensionnement de l'installation vis-à-vis du risque de dissémination de substances radioactives.

Pour chacune des étapes de manutention des colis, une analyse préliminaire de risques, axée sur les problématiques de chute et de collision pouvant entraîner une perte de confinement du colis primaire, a permis d'identifier des scénarios enveloppes permettant de définir ou confirmer les dispositions techniques et organisationnelles et permettre leur dimensionnement pour maîtriser les risques de dissémination de radionucléides.

Résultats de l'analyse préliminaire de risques

Deux types de procédés de manutention sont distingués :

- le procédé de transfert des hottes contenant les colis de stockage jusqu'aux alvéoles de stockage ;
- le procédé de mise en stockage des colis de stockage.

Pour chacun des procédés, des zones/locaux présentent des risques liés aux opérations de manutention susceptibles de contaminer les installations et de relâcher des substances radioactives.

Pour le procédé de transfert, trois zones où des risques de collision/chute ont été identifiés :

- le transfert surface/fond ;
- la zone centrale de l'installation souterraine ;
- la zone d'échange de la hotte véhicule/navette.

Pour le procédé de mise en stockage des colis, les alvéoles MAVL (la cellule de manutention ainsi que la cellule de stockage) constituent une zone à risque.

Il faut noter qu'il n'a pas été identifié de situations pouvant mener à une perte de confinement dans les alvéoles HA.

Pour chacune des zones à risques retenues, représentées dans la Figure 3.4-8, des scénarios enveloppes ont été identifiés qui feront l'objet de simulations afin de définir ou confirmer les dispositions matérielles ainsi que leur dimensionnement (ex. estimations des conséquences radiologiques en vue de statuer sur la nécessité de retenir un système de ventilation et le cas échéant de le dimensionner).

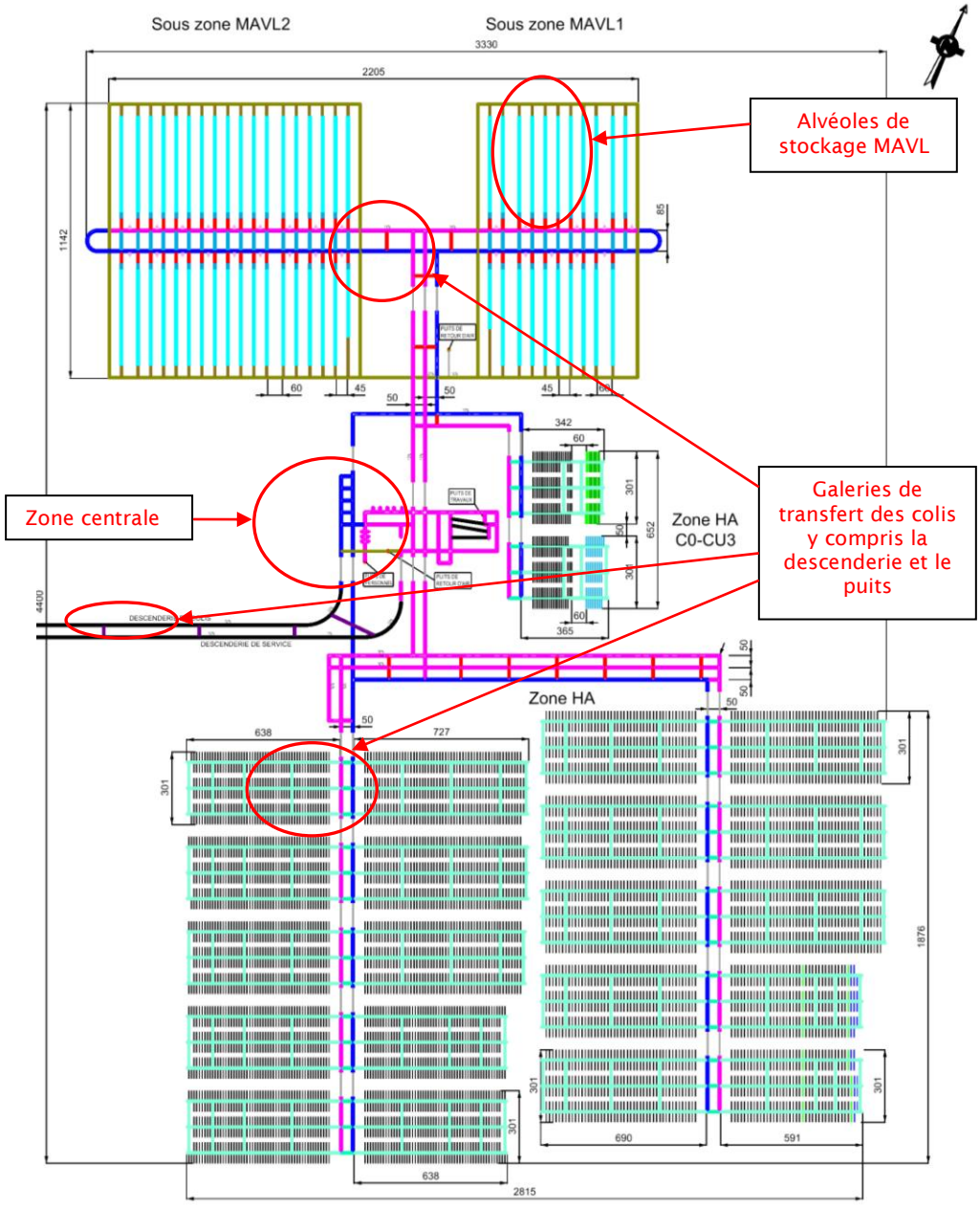


Figure 3.4-8 Synthèse des zones à risques de chute/collision

Mesures de maîtrise des risques

Au regard de la description disponible des procédés envisagés au stade du jalon 2009, l'analyse préliminaire de risques a permis de dégager les premières options de sûreté (principes de conception et dispositions matérielles ou organisationnelles à mettre en œuvre) pour maîtriser les risques à chaque étape de la manutention. On peut citer :

- un domaine de fonctionnement autorisé prenant en compte dès le départ des dimensionnements pour des valeurs de pente et de vitesse supérieures à la valeur nominale (par exemple une vitesse de transfert de 20 km/h en descenderie) ;
- un domaine de fonctionnement nominal privilégiant :
  - ✓ des pentes faibles (10% en moyenne pour la descenderie, 0 à 3% pour les galeries de transfert et pente nulle en alvéoles) ;
  - ✓ des vitesses de circulation des véhicules et des engins de manutention en alvéole limitées (à titre d'exemple sur la base des solutions de transfert étudiées : 10 km/h en descenderie et en galeries, 10 m/min (0,6 km/h) pour les engins de manutention en alvéole) ;

- ✓ un programme de gestion des flux de colis et de véhicules ;

- une réduction de la fréquence des événements par une redondance des équipements ayant une fonction importante dans le procédé : levage des colis, positionnement des colis, freinage des véhicules, guidage des véhicules au niveau des systèmes mécanique, de freinage, électrique, et du contrôle-commande ;
- la mise en place d'une surveillance de l'installation et des opérations pour maintenir l'installation dans son domaine de fonctionnement :
  - ✓ des dispositifs de contrôle de position à chaque étape (du colis, des véhicules, des moyens de manutention) ;
  - ✓ des programmes de surveillance et de maintenance des équipements et des installations ;
  - ✓ des caméras de surveillance ;
- une minimisation des conséquences par notamment :
  - ✓ la minimisation des hauteurs de manutention des colis (installation d'une table élévatrice pour le gerbage des colis pour le pré-empilage, remplissage par couches successives pour la mise en alvéole au moyen du pont gerbeur). A titre illustratif, les hauteurs sont de l'ordre de 150 mm ;
  - ✓ la limitation de la présence de personnels (tous les procédés peuvent se faire de manière entièrement automatisée avec du personnel déporté en salle de commande) ;
  - ✓ le dimensionnement des moyens de transport et des hottes aux collisions.

Scénarios envisagés

Le Tableau 3.4-4 ci-après rassemble, pour chaque étape du procédé de transfert des hottes de la surface jusqu'à l'alvéole de stockage, les dispositions matérielles et organisationnelles envisagées ainsi que les situations incidentelle et accidentelle identifiées.

Tableau 3.4-4 Situations envisagées pour chaque étape du procédé de transfert des hottes de la surface jusqu'aux alvéoles de stockage au stade actuel

Etapes du procédé		Mesures de maîtrise des risques	Situations
Prise en charge des hottes en surface		Rails de guidage pour le véhicule Platines d'ancrage de la hotte	Situations similaires au cas descenderie
Transfert surface / fond	Véhicule en descenderie	Dispositifs de freinage redondants et indépendants, associés à 2 systèmes de ralentissement complémentaires Guidage mécanique par galets associé à un guidage électronique Procédures de circulation et de gestion des flux de véhicules en descenderie Programme de maintenance des équipements	**Collision du véhicule et/ou de la hotte avec des obstacles** dans la descenderie pouvant conduire : • à un choc frontal ou latéral du véhicule, • à un incendie **Séisme**
	Funiculaire en descenderie	Dispositifs de freinage redondants et indépendants Programme de maintenance des équipements	**Non arrêt du funiculaire en station basse** **Séisme**
	Puits et cage	Systèmes de freinage redondants Redondance des câbles de suspension Programme de maintenance des équipements	**Non arrêt de la cage en fond de puits** **Séisme**
Transfert jusqu'au module de stockage		Avaloirs de positionnement de la hotte Vitesse réduite de la navette et du véhicule	**Collision d'une hotte posée sur ses pieds dans la zone d'échange par un véhicule de transfert ou une navette** **Collision entre deux véhicules** dans la zone centrale ou la zone d'échange **Séisme**
Transfert jusqu'à l'alvéole	Navette sur pneus (HA)		**Collision de la navette HA suite dérive avec le robot pousseur, les operculaires** **Séisme**
	Navette sur rails (HA et MAVL)	Rails de guidage	**Séisme**

Le Tableau 3.4-5 ci-après présente, pour chaque procédé de mise alvéole de stockage MAVL, les dispositions matérielles et organisationnelles envisagées ainsi que les situations incidentelles et accidentelles identifiées. Il est important de rappeler que la mise en alvéole de stockage des colis HA ne conduit pas à des situations de chute ou de collision pouvant conduire à dégrader le colis de stockage.

Tableau 3.4-5 Mise en alvéole des colis MAVL

Procédés	Mesures de maîtrise des risques	Situations
Chariot élévateur	Redondance des équipements du système de levage (systèmes mécanique, électrique, freinage) Redondance des capteurs/actionneurs Butées et capteurs de position pour les mouvements Limiteur de couple sur les motorisations Dispositifs de contrôle de chaque opération (position du colis et du chariot) Pente nulle, vitesse de déplacement limitée Système anti-écrasement sur les portes Programme de maintenance des équipements	**Chute de colis (150 mm) dans la cellule de manutention et pendant le transfert en alvéole** **Séisme**
Pont gerbeur	Redondance des équipements (systèmes mécanique, électrique, freinage) Redondance des capteurs/actionneurs Butées et capteurs de position pour les mouvements du pont Contrôle de position du colis Système anti-écrasement sur les portes et verrouillage de la porte supérieure de la cellule de stockage Limiteur de couple sur les motorisations Programme de maintenance des équipements Minimisation des hauteurs de manutention	**Chute/collision suite à une mauvaise mise en configuration de la cellule de manutention pour le stockage de la n+1^{ième} couche** **Collision du colis par la porte supérieure de la cellule de stockage** **Séisme**
Pré-empilage	Système de blocage sur la chaine de levage Redondance des équipements du système de levage Redondance des capteurs/actionneurs Minimisation des hauteurs de manutention (table élévatrice) Dispositifs de contrôle de chaque opération (position du colis, du chariot, de l'unité de levage) Butées et capteurs de position pour les mouvements Système anti-écrasement sur les portes Pente nulle, vitesse de déplacement limitée Programme de maintenance des équipements	**Chute de 150 mm dans la cellule de manutention** (lâcher de charge intempestif, rupture de la chaine de levage) **Basculement de la pile de colis suite à un arrêt franc du chariot pendant le transfert en alvéole** **Collision de la pile de colis avec les piles en fond d'alvéole ou le fond d'alvéole suite au non arrêt du chariot**, à une mauvaise cartographie des colis en place **Séisme**

3.4.3.3 Risque d'explosion

Origine du risque

En dehors du risque d'explosion relatif à la présence d'hydrogène de radiolyse, la principale source de danger d'explosion dans les installations souterraines est associée à l'utilisation de véhicules électriques équipés de batteries. Les opérations de charge de ces batteries génèrent des gaz explosifs qui doivent être gérés pour empêcher la formation d'atmosphères explosives.

Ce risque peut avoir d'autres origines qui seront identifiées et traitées ultérieurement au stade de la DAC, telles que la présence d'équipements sous pression et l'utilisation de produits spécifiques entreposés notamment dans la zone centrale (produits chimiques, gazoles, huiles…).

Dispositions

La prévention de création d'atmosphères explosives dans les installations souterraines est axée sur le choix technologique des batteries qui seront installées, celui-ci privilégiant des batteries étanches et limitant la production d'hydrogène. Les ateliers ou zones de charge des batteries seront équipés d'une ventilation spécifique adaptée aux relâchements prévisibles. Par ailleurs, la charge sera asservie au fonctionnement de la ventilation.

Ces zones seront équipées de capteurs permettant :

- Une mesure de la concentration d'hydrogène avec des alarmes étalonnées conformément aux indications de la réglementation en vigueur (Arrêté du 29 mai 2000 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2925 « ateliers de charge d'accumulateurs ») et des objectifs de protection retenus au chapitre 1 ;
- Un contrôle du bon fonctionnement de la ventilation.

L'implantation de ces zones de charge des batteries sera choisie, dans la mesure du possible, à des distances suffisantes des colis de stockage et d'équipements importants pour la sûreté ou la sécurité. Dans certains cas, des dispositions de protection pourront être mises en place pour limiter les conséquences d'une explosion éventuelle.

Tous les équipements qui peuvent être à l'origine d'une explosion seront conçus et installés conformément à la réglementation en vigueur, une maintenance préventive des appareils sera organisée et la formation du personnel mise en œuvre.

3.4.3.4 Risques chimiques liés aux relâchements de gaz toxiques ou corrosifs

Origine du risque

Le risque potentiel d'origine chimique dans les installations de transfert et souterraines résulte :

- Des gaz toxiques émis par les colis MAVL liés au phénomène de radiolyse, notamment le monoxyde et le dioxyde de carbone émis par les fûts d'enrobés bitumineux ;
- Des gaz toxiques émis par les procédés ou équipements utilisés (véhicules alimentés avec du gazole lors des opérations de creusement ou lors d'intervention des services de secours) ;
- Des produits chimiques susceptibles d'être utilisés dans les installations (décapants, produits de nettoyages, huiles moteurs, lubrifiants mécaniques…) et entreposés notamment dans la zone centrale des installations souterraines.

En situation normale, les conséquences potentielles pour les travailleurs sont l'intoxication, l'irritation des muqueuses, l'asphyxie et l'exposition à des produits cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction (CMR).

Les situations accidentelles associées peuvent être consécutives à un mélange de produits chimiques incompatibles provoquant une réaction à l'origine d'un échauffement voire d'un incendie ou explosion.

Dispositions

Au regard de la faible quantité de gaz susceptible d'être relâchée et de la ventilation des installations, le personnel n'est pas exposé à des valeurs susceptibles de porter atteinte à sa santé. Les études ultérieures permettront de répertorier plus précisément les produits présents et leur quantité qui sera limitée aux besoins de l'exploitation.

Concernant la présence de produits chimiques incompatibles, une gestion rigoureuse de l'exploitation sera mise en place complétée de dispositions constructives empêchant leur déversement et leur mélange et permettant leur collecte et récupération. La conception des installations sera conforme aux exigences de l'arrêté du 31 décembre 1999 modifié fixant la réglementation technique générale destinée à prévenir et limiter les nuisances et les risques externes résultant de l'exploitation des installations nucléaires de base.

Dans les zones et locaux qui seront identifiés comme dangereux, des dispositifs de surveillance de l'air et de contrôle des produits seront mis en place. La limitation des conséquences potentielles sur les personnes sera prévue au travers de dispositifs tels que douches, lave-œil, masques…

3.4.3.5 Risques liés aux dégagements thermiques d'origine non nucléaire

Origine du risque

Les principales sources de dégagement thermique ne provenant pas des colis de stockage sont :

- Les moteurs des différents véhicules, équipements de manutention et du système de ventilation ;
- Les équipements électriques répartis dans les installations ;
- l'éclairage des locaux.

Dispositions

La ventilation des installations est dimensionnée pour assurer la fonction « conditionnement » de l'air et permettre le fonctionnement correct des matériels installés.

La conception des systèmes électriques sera adaptée aux puissances nécessaires dans les installations pour éviter la surchauffe des câbles et équipements électriques.

La conception des véhicules et équipements identifie les surfaces chaudes présentant des risques pour les travailleurs et les protège par la mise en place de protections (systèmes de refroidissement, capots…).

Une maintenance préventive de ces matériels et équipements permettra de détecter toute dérive de fonctionnement. Les locaux sensibles tels que les locaux électriques sont équipés d'une ventilation spécifique et sont surveillés pour détecter toute augmentation de température ou un incendie (fumées).

3.4.3.6 Risques d'inondation interne (rupture de canalisation)

Origine du risque

Le risque d'inondation interne est lié à la présence de fluides dans l'installation pour lesquels il peut être envisagé une fuite des diverses tuyauteries les transportant ou un débordement d'une capacité de rétention. Les fluides sont véhiculés dans les installations souterraines dans différents réseaux : alimentation en eau potable, en eau incendie, en eau pour la préparation du béton, récupération des eaux d'infiltration et effluents.

Ce risque peut également provenir des effluents issus de l'extinction d'un feu. La présence d'eau dans les installations génère des risques supplémentaires vis-à-vis de la maîtrise de la criticité (évolution défavorable de la réactivité du milieu) et de la maîtrise du confinement (risque de corrosion si présence d'eau au contact des équipements et colis).

Dispositions

Les cheminements seront choisis pour être protégés des activités de construction et d'exploitation, en dehors des zones de passage des véhicules. La conception privilégiera des matériaux étanches et résistants. La quantité de fluides sera limitée autant que possible. A titre d'exemple, le choix des systèmes d'extinction devra limiter la quantité d'effluents produits ainsi que les procédés mis en œuvre.

Le passage de tuyauteries ou l'implantation de réservoirs sont exclus dans des galeries en cours d'exploitation et dans les alvéoles de stockage. Le génie civil des galeries assure une certaine étanchéité. Les eaux d'inondation voire d'infiltration sont évacuées gravitairement par l'intermédiaire de caniveaux dimensionnés pour les débits maximaux cumulés. Des capacités de rétention sont disposées dans différents points bas des installations. La présence de liquide dans un puisard déclenche automatiquement une alarme reportée en salle de conduite.

3.4.3.7 Risque lié à la perte d'auxiliaires (distribution électrique, conduite de l'installation, systèmes de ventilation, moyens de contrôles et de surveillance...)

La perte d'auxiliaires est susceptible d'entraîner l'arrêt général de l'installation. Une évaluation des risques associés à cette perte est menée au travers de l'analyse des systèmes suivants : la distribution électrique, la conduite de l'installation, la ventilation ainsi que les moyens de contrôles et de surveillance.

Distribution électrique

L'absence de distribution électrique peut provenir d'un déclenchement général du réseau, d'une rupture sur la ligne d'alimentation principale, d'un défaut d'équipements électriques tels que des câbles, des armoires… voire d'une agression de type incendie ou séisme.

La perte de l'alimentation électrique peut notamment occasionner :

- L'arrêt des systèmes de ventilation ;
- L'arrêt des véhicules (électriques) de transfert non pourvus d'alimentation par batteries en fonctionnement normal ;
- L'insuffisance des moyens d'évacuation du personnel vers la surface (ascenseur, éclairage…) ;
- L'absence des moyens de conduite et de surveillance des installations (contrôle radioprotection, surveillance incendie, surveillance des rejets…).

Afin de limiter l'occurrence de défauts d'alimentation électrique dans les installations souterraines, la conception sera basée sur le respect des principes suivants :

- l'alimentation générale du site est sécurisée par sa livraison en surface par deux voies d'alimentation distinctes et un ensemble de groupes électrogènes permettant de reprendre l'alimentation des fonctions vitales ;

- L'alimentation des installations souterraines est distribuée au moyen de deux voies distinctes alimentant des sous-stations électriques réparties dans le fond ;

- Chaque sous-station électrique alimente un nombre défini de modules de stockage par l'intermédiaire de deux alimentations normales et deux alimentations secourues/ondulées ;

- Les équipements sensibles, qui seront identifiés lors des études détaillées, pourront basculer sur une alimentation secourue/ondulée ;

- La distribution électrique sera conçue et implantée en minimisant les modes communs de défaillance (incendie, séisme) notamment pour les équipements assurant des fonctions de sécurité et de sûreté ;

- Les équipements de manutention et véhicules de transfert sont munis d'un système de dépannage ultime soit mécanique soit disposant de sa propre alimentation électrique.

Les dispositions de maîtrise des risques seront principalement :

- Le choix des catégories de câbles et matériels utilisés est conforme aux normes et arrêtés en vigueur et vise à limiter les départs de feu et leur propagation (câbles C1 et CR1) ;

- Les installations et matériels font l'objet de contrôles périodiques et de maintenance ;

- Des dispositifs de surveillance alertent la salle de conduite des défauts électriques au niveau de la distribution, dans les sous-stations et sur les équipements ; le démarrage et/ou le basculement sur les moyens de secours s'effectue automatiquement en cas de manque de tension électrique ;

- Chaque local ou groupe de locaux électrique est protégé et isolé dans un secteur de feu ; des capteurs détectent toute anomalie de fonctionnement et déclenchent les actions appropriées (report en salle de conduite, arrêt de charge des batteries sur arrêt ventilation…).

Ainsi, l'architecture des réseaux électriques est définie de manière à assurer, pour les équipements considérés comme sensibles, une redondance d'alimentation électrique, un secours (par groupes électrogènes ou batteries), voire une permanence d'alimentation de certains équipements (alimentation par des équipements distincts et séparés physiquement, par des batteries et onduleurs) comme les équipements de radioprotection et de surveillance des rejets, le réseau de détection incendie, les alarmes et équipements de contrôle-commande.

Ces dispositions permettent de répondre aux principes de base de la conception qui sont la mise à l'état sûr des installations et la mise à l'abri des personnes (évacuation…).

Systèmes de conduite de l'installation

Les dysfonctionnements ou la perte du système de conduite de l'installation peuvent provenir d'une erreur dans le système de programmation, d'une configuration non prévue, d'une perturbation électronique du système de gestion par des parasites ou par des pannes sur les capteurs. Des agressions externe (séisme) et interne (incendie) sont aussi des causes identifiées.

La déficience des systèmes de conduite mène à un arrêt des opérations conduites à distance ce qui correspond à la majorité des modes de fonctionnement pour le transfert et la mise en alvéole des colis de stockage. Cependant, les opérations en cours doivent pouvoir être terminées ou continuées pour mettre les installations en position sûre. Il est donc prévu une conduite semi automatique ou manuelle des équipements et véhicules pour remplir cette fonction dans un mode de fonctionnement dégradé.

Les dispositions à prévoir sur les systèmes de conduite de l'installation pour limiter leur défaillance sont les suivantes :

- La conception et la définition du système d'informations est considérée dès la phase de conception en incluant l'exploitation et la maintenance des installations ;
- Le choix des équipements et matériels des différents niveaux de l'architecture fonctionnelle doit être cohérent pour ne pas être source de dysfonctionnements (gestion des interfaces) ;
- Le contrôle-commande doit être sécurisé pour éviter tout démarrage intempestif ;
- Des contrôles et tests périodiques du programme de gestion du système d'informations et des capteurs de sécurité sont à réaliser ;
- Les composants électriques et électroniques sont protégés contre les parasites ;
- Les capteurs utilisés pour les équipements sensibles de l'installation sont auto surveillés ;
- Les opérations de transfert, d'accostage et de mise en alvéole font l'objet d'un contrôle visuel.

Systèmes de ventilation

L'arrêt des systèmes de ventilation des installations souterraines peuvent provenir d'une défaillance d'un ventilateur ou du contrôle-commande, d'une perte de l'alimentation électrique, d'un déclenchement des systèmes de sécurité incendie (arrêt du soufflage, activation des clapets coupe-feu sur température élevée…) ou en cas d'aléa externe tel qu'un séisme.

La perte de la ventilation dans les installations souterraines peut conduire à :

- La perte de la fonction « confort » pour le personnel travaillant dans le fond conduisant à une évacuation des postes de travail et à un repli vers des zones dédiées ;
- La perte du confinement dynamique notamment au niveau des alvéoles MAVL ;
- La perte de la fonction de dilution et d'évacuation de l'hydrogène de radiolyse provenant des colis placés dans les alvéoles de déchets MAVL, entraînant un risque potentiel d'explosion ;
- L'atteinte de températures inacceptables pour le personnel ou les équipements dans les galeries et divers locaux souterrains.

Le principe de base à retenir pour la conception est la mise à l'état sûr des installations dans cette situation. Cela consiste à arrêter les opérations de transfert et de mise en alvéole et à évacuer le personnel.

Les dispositions à retenir pour limiter la perte de la ventilation sont à graduer en fonction de l'importance des risques engendrés. Au cours du fonctionnement normal des installations souterraines, les équipements du système de ventilation des alvéoles de stockage MAVL relâchant de l'hydrogène et des gaz radioactifs sont des éléments sensibles pour lesquelles les dispositions suivantes sont à retenir :

- Redondance des équipements (ventilateurs, systèmes de filtration…) et de leur fonction support (alimentation électrique, moyens de surveillance…) ;
- Maintenance périodique des organes mécaniques : ventilateurs, grilles de ventilation, clapets… ;
- Maintien du sens de circulation de l'air pour ne pas avoir une inversion des pressions entre locaux adjacents.

En fonctionnement accidentel de type incendie ou chute/collision de colis, certains systèmes de ventilation prévus pour répondre à ces situations seront susceptibles de suivre les dispositions énoncées précédemment.

Les systèmes de ventilation sont munis de moyens de mesure pour surveiller le fonctionnement de la ventilation et agir en cas de dérive ou de situations accidentelles. Les principaux paramètres à surveiller concernent la pression dans les réseaux (respect des cascades de dépression) et au niveau des étages de filtration (absence de colmatage), la température dans les locaux et au niveau du dernier niveau de filtration, la mesure du débit d'air (fonctionnement suffisant pour l'évacuation des calories et des gaz).

Ces moyens de mesure déclenchent des alarmes reportées en salle de conduite afin d'initier les actions adaptées (en automatique ou manuel).

Les moyens de contrôle et de surveillance

La perte des moyens de contrôle et de surveillance peut provenir d'une défaillance des capteurs, d'une perte d'alimentation électrique ou d'une agression interne (incendie, inondation…) ou externe (séisme, inondation…).

Les études détaillées permettront de déterminer les moyens de contrôle et de surveillance qui participent au maintien des fonctions de sûreté de l'installation tels que la surveillance radiologique des installations (irradiation et contamination) et des rejets (contamination, gaz…), les systèmes de contrôle-commande des équipements de manutention et véhicules de transfert, les systèmes de détection d'incendie.

Ces moyens, identifiés comme éléments importants pour la sûreté, seront alimentés en énergie par un réseau électrique permanent, les liaisons entre les capteurs et le système de supervision seront redondantes. Une analyse des modes communs de défaillance de ces moyens permettra de guider leur conception et implantation qui seront précisées pour la DAC.

3.4.3.8 Risque lié au facteur humain et organisationnel

Origine du risque

Les risques liés au facteur humain et organisationnel sont la réalisation d'erreurs de la part du personnel d'exploitation pouvant conduire à une dégradation de la sûreté des installations et à des risques pour le personnel, le public et l'environnement.

Dispositions

La prévention de ce risque est gérée par la mise en œuvre, dès la conception, d'une démarche pour réduire les risques au travail en recherchant une meilleure adaptation des postes de travail à leurs utilisateurs (ergonomie) et en évaluant l'adaptation des procédures et organisations proposées. Cette démarche décrite dans la section 2.3.2.8 du chapitre 2 sera mise en œuvre lors des futures études de conception. Concrètement, la conception des équipements et véhicules limite la présence de personnel et fait le choix de dispositifs passifs. Une procédure spécifique sera mise en place.

A ce stade de la conception, une recherche d'automatisation des opérations de transfert et de mise en alvéole de stockage est la base de la conception des véhicules et équipements. Les postes de travail sont parfois maintenus pour permettre un fonctionnement en mode semi automatique des équipements utilisés dans les installations.

3.4.3.9 Autres risques (construction des ouvrages, gestion de la co-activité)

Cette section présente une synthèse des principaux risques liés aux activités de construction des installations et à la concomitance d'installations en exploitation nucléaire et en cours de construction.

Construction des ouvrages

Les activités de construction concernent le creusement, le soutènement, le revêtement et l'équipement des ouvrages souterrains. Elles relèvent d'un chantier de type travaux souterrains ou exploitation minière. Lors des diverses opérations de construction des installations de stockage de déchets, les risques d'atteinte physique du personnel sont liés à des causes rencontrées de manière générale dans les chantiers.

Il s'agit de risques conventionnels à prendre en considération :

- Le risque d'écrasement de personnes consécutif à une chute de charges, une chute de blocs en galeries, une chute d'objets en puits ;
- Le risque d'écrasement par un équipement mobile au cours d'une maintenance dans un puits ou par un véhicule en mouvement dans les galeries ;
- Le risque de collision entre engins, véhicules ;
- Le risque de chute de personnes lié à des travaux en élévation (notamment dans les puits) ;
- Le risque d'électrisation ;
- Le risque d'incendie ;
- Les risques inhérents à l'ambiance de travail notamment dans les installations souterraines (bruit, poussières, gaz toxiques émis par les engins…).

La réduction de ces risques repose :

- sur la prévention avec un choix d'équipements et d'engins adaptés, fiables, munis des sécurités nécessaires et entretenus, dans le respect des réglementations en vigueur ;
- sur la formation du personnel et sa sensibilisation aux différents types de risques encourus ;
- sur le respect des procédures, des règles de circulation et d'évacuation ;
- sur le port des équipements de protection individuelle assurant la sécurité des personnes.

La mise en place de protections physiques (barrières, garde-corps, capots…), l'utilisation d'engins dont les postes de commande sont en retrait de la zone du front du chantier, l'équipement des réseaux de sécurité des chantiers au fur et à mesure de leur progression contribuent aussi à la réduction des risques encourus par le personnel.

Parmi l'ensemble des risques évoqués, le risque d'incendie se distingue dans le milieu souterrain dans la mesure où il peut avoir des conséquences collectives. Des dispositions permettant l'évacuation des personnes sont prévues au stade de la conception. La disposition adoptée est un système de ventilation permettant l'extraction des fumées et l'existence de liaisons entre galeries adjacentes favorisant l'évacuation des personnes.

Gestion de la co-activité

La possibilité de construire les modules de stockage au fur et à mesure de l'exploitation induit la coexistence d'activités nucléaires et d'activités non nucléaires, nommée co-activité.

La séparation entre les activités d'exploitation nucléaire, caractérisées par des risques et des contraintes particuliers (radioprotection, confinement des substances radioactives, sûreté des opérations de transfert des colis…), et les activités de construction/fermeture, permet d'éviter toute interférence opérationnelle.

Ce principe de séparation conduit à adopter deux circuits dédiés en cas de co-activité :

- l'un aux activités d'exploitation nucléaire, notamment le transport des hottes contenant les colis, qui s'organise autour de l'ouvrage de liaison surface/fond de descente des colis et des galeries de transfert des colis jusqu'aux galeries d'accès aux alvéoles de stockage ;

- l'autre aux activités de construction (et de fermeture), qui s'organise autour des ouvrages de liaison surface/fond de travaux et de service et des galeries de liaison dédiées aux travaux.

Cette séparation est également réalisée pour les circuits de ventilation : les galeries de transfert des colis disposent d'une alimentation en air frais indépendante de celle des galeries de travaux afin d'éviter à la fois une introduction de poussières et de fumées engendrées par les activités de construction dans la zone nucléaire et une dissémination dans la zone travaux.

En revanche, les circuits de retour d'air et de désenfumage peuvent être communs pour les deux types de galeries lorsqu'il n'y a pas de risque de dissémination de substances radioactives dans les procédés d'exploitation nucléaire mis en œuvre dans les installations de stockage (transfert des colis dans les galeries et mise en place dans les alvéoles). Cette disposition est ainsi retenue pour l'ensemble des infrastructures de liaison et dans les zones de stockage des déchets HA et des combustibles usés.

Concernant la zone MAVL, une partie des déchets produit de l'hydrogène par radiolyse des matières qu'ils contiennent et des gaz radioactifs. La ventilation évite une accumulation de l'hydrogène et de gaz radioactifs dans les alvéoles et un circuit de retour d'air dédié, indépendant des autres circuits de ventilation, est prévu.

Le circuit de ventilation de l'ouvrage de liaison surface/fond de transfert de colis constitue également un circuit séparé, indépendant des autres circuits de ventilation, afin de se prémunir des conséquences d'un incident pendant la descente des colis.

Les différents circuits décrits ci-avant sont séparés avec des portes ou des sas au niveau des galeries en interface entre la zone « nucléaire » et la zone « travaux » ; des barrages de ventilation assurent la séparation des différents circuits de ventilation.

La Figure 3.4-9 illustre un exemple possible de simultanéité d'activités de travaux et d'exploitation environ 30 années après la mise en service industrielle du stockage.

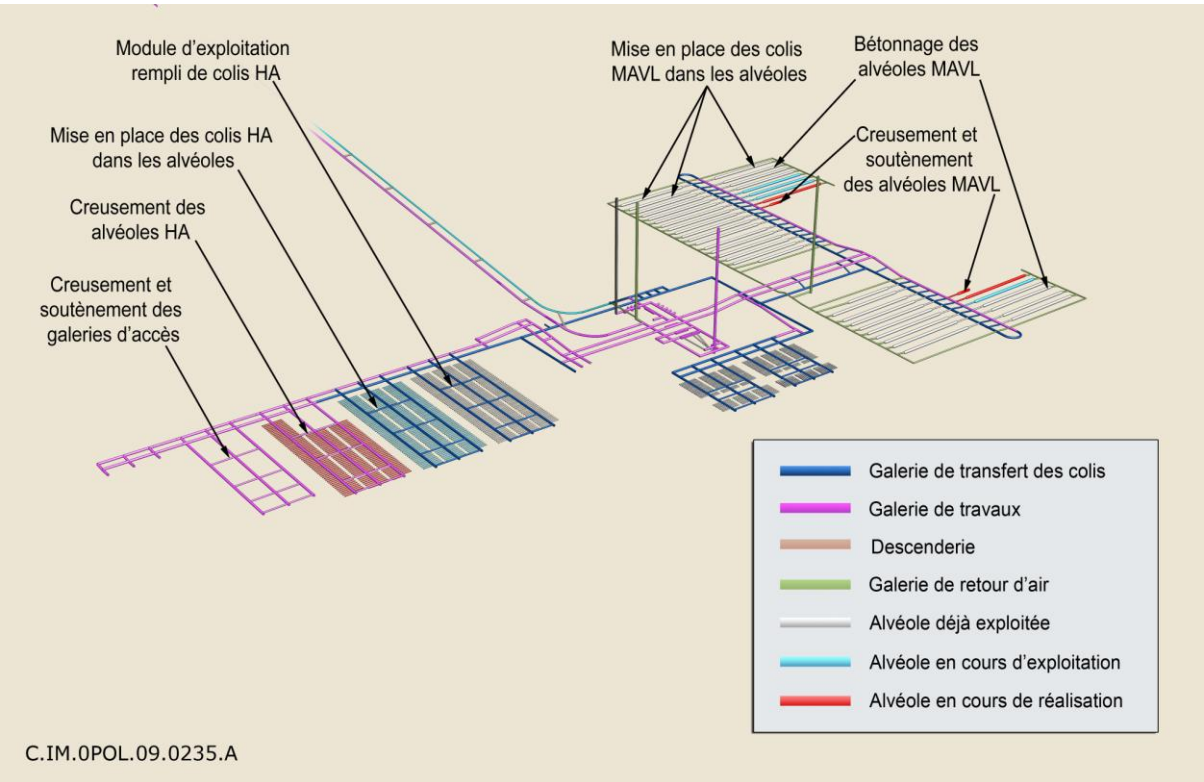


Figure 3.4-9 *Séparation des circuits d'exploitation et de travaux environ 30 années après la mise en service industrielle du stockage*

L'ensemble de ces dispositions devrait permettre d'éviter, pour le personnel en zone de travaux, toute exposition radiologique liée à la proximité de la zone d'exploitation nucléaire. Inversement, les

séparations (sas, portes et barrages de ventilation) seront dimensionnées pour qu'un incendie dans la zone travaux (danger dimensionnant dans le milieu souterrain) ne se propage pas vers la zone en exploitation nucléaire soit par les galeries en interface soit par les circuits de ventilation.

3.4.4 Risques non nucléaires d'origine externe

3.4.4.1 Séisme

Origine du risque

Les installations de transfert et souterraines seront implantées en Meuse/Haute-Marne. Les données de sismicité disponibles confirment que la région est peu sismogène (cf. chapitre 2).

Pour le dimensionnement des installations et des ouvrages d'une INB dans les régions à faible sismicité comme la région de Meuse/Haute-Marne, la règle fondamentale de sûreté relative à la détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface (RFS 2001-01) impose d'appliquer le spectre minimal forfaitaire dont les accélérations sont présentées dans le Tableau 3.4-6 (spectre calé à 0,1 g à l'infini ; calculé en fonction des caractéristiques du site de Bure).

Tableau 3.4-6 Spectre minimal forfaitaire imposé par la RFS 2001-01 à appliquer dans le secteur de Meuse/Haute-Marne

Période (s)	0	0,1	0,2	0,4	1	2
Accélération (g)	0,01	0,23	0,22	0,15	0,06	0,03

Ce spectre forfaitaire s'applique pour des installations situées en surface. Concernant le spectre à appliquer pour le dimensionnement d'installations situées en profondeur, il est difficile à ce stade de le définir. Il est convenu qu'une atténuation avec la profondeur peut être appliquée aux installations souterraines sous réserve que celle-ci puisse être définie (ordre de grandeur et répartition selon les fréquences) et démontrée en se fondant sur les mesures faites sur le site du Laboratoire souterrain ainsi que sur le REX d'installations souterraines à l'étranger.

Pour cela, un programme expérimental dans le laboratoire souterrain de Bure est en cours. A ce stade, les enregistrements disponibles en surface et au fond ne sont qu'au nombre de deux et sont relatifs à des événements de très faible énergie.

En l'absence d'informations suffisantes à ce stade, le dimensionnement des installations souterraines est calé sur le séisme majoré de sécurité (SMS) de surface. L'utilisation d'un coefficient d'atténuation entre la surface et le fond sera envisageable pour la DAC si les valeurs à retenir peuvent être justifiées et étayées. Cependant, l'Andra considère que la prise en compte d'un séisme de surface pour le dimensionnement des installations et équipements souterrains est pénalisante pour la conception. Elle propose d'étudier, en alternative au coefficient d'atténuation, la possibilité de retenir pour le dimensionnement de ses équipements et structures un spectre de tenue au séisme se fondant sur les caractéristiques calculées pour un séisme représentatif de la région Meuse/Haute Marne, ces valeurs étant inférieures aux caractéristiques minimales définies par la RFS.

Quel que soit le spectre retenu, le séisme est pris en compte pour le dimensionnement des structures et équipements pour le maintien des fonctions importantes pour la sûreté des installations nucléaires pendant et/ou à la suite d'un séisme plausible. Les conséquences d'un séisme peuvent être :

- Une dégradation des puits, galeries et alvéoles ;
- Une modification de la géométrie des colis ou des réseaux de colis ;
- Une situation de chute ou collision impliquant un colis de stockage lors de son transfert ou de sa mise en alvéole ;
- La dégradation de protections radiologiques telles que celles assurées par les hottes, les operculaires ou bouchon des alvéoles HA, les parois et portes de l'alvéole MAVL ;
- L'endommagement des systèmes de ventilation, des alimentations électriques.

Les risques associés à l'occurrence d'un séisme concernent la dispersion de substances radioactives, une exposition externe du personnel, un accident de criticité, une explosion, une venue d'eau dans les installations, un début d'incendie.

Dispositions

A ce stade, l'ensemble de ces situations n'a pas été analysé dans le détail. En première analyse les principales dispositions sont :

- Le dimensionnement des ouvrages souterrains au SMS afin de ne pas devenir agresseurs des équipements de sûreté et des colis de stockage et maintenir leur fonction de confinement ;
- Le dimensionnement des véhicules de transfert et équipements de manutention pour ne pas lâcher ou faire basculer les colis au cours de leur transfert (conception intégrant des dispositifs anti-basculement, anti-collision…) ;
- L'agencement des piles de colis de telle façon que les colis ne basculent pas sous l'effet d'un séisme ;
- La fixation des équipements afin de ne pas devenir des missiles ou projectiles pouvant atteindre une fonction importante de sûreté ;
- Le dimensionnement des systèmes de ventilation qui participent à une fonction de sûreté : confinement ou évacuation des gaz de radiolyse ;
- Le dimensionnement des protections radiologiques pour assurer leur fonction pendant et après un aléa sismique.

En complément, le fonctionnement de certains équipements pourra être asservi à des dispositifs de mesure (accélération) permettant de détecter une sollicitation sismique dans les installations souterraines et mettre les installations en position sûre.

A l'issue d'un séisme, des inspections de toutes les installations souterraines sont réalisées afin de détecter les dommages à l'ouvrage, les éboulements de roches ou de débris de revêtement ainsi que toute autre défaillance afin de prendre les mesures correctives nécessaires.

3.4.4.2 Chute d'avion

Ce risque n'est pas considéré pour les installations souterraines. Concernant les installations de transfert qui sont en liaison avec les installations de surface, la nécessité éventuelle d'un dimensionnement à une chute d'avion sera précisée lorsque l'implantation et la description des installations de surface seront connues (cf. chapitre 2). Concernant la liaison surface/fond, l'impact d'une chute d'avion sera évalué sur la partie de la descenderie ou du puits située en partie supérieure sur une profondeur n'allant pas au delà de 10 mètres. Au regard de la surface offerte et surtout du flux de colis par jour transitant dans la descenderie ou le puits, le risque de chute d'avion n'est pas retenu pour son dimensionnement.

3.4.4.3 Perte de la fourniture en énergie et utilités

Les installations souterraines sont alimentées en électricité et utilités par l'intermédiaire des installations de surface. Les dispositions retenues au niveau du site pour maintenir l'alimentation en énergie électrique et en eau dans les installations de surface (cf. chapitre 2) sont valables pour l'alimentation des installations souterraines.

En complément, les installations souterraines pourront être secourues par des groupes électrogènes fixes situés au fond. Les équipements des systèmes de sécurité et de surveillance qui seront identifiés au cours des études de conception détaillées seront alimentés par un réseau permanent pendant la mise en service des systèmes de secours. Il pourra s'agir des équipements de radioprotection et de surveillance des rejets, du réseau de détection incendie, des alarmes et des équipements de contrôle-commande.

Le démarrage des moyens de secours s'effectue automatiquement en cas de manque de tension électrique.

3.4.4.4 Conditions climatiques extrêmes

Les installations de transfert et souterraines ne sont pas directement concernées par les conditions climatiques extrêmes : neige et vents, températures extrêmes, intempéries et foudre.

Neige et vents

En complément des contraintes sur le dimensionnement des installations situées en surface, les effets des vents sur la conception des systèmes de ventilation des installations souterraines seront à considérer. En effet, la ventilation est constituée de systèmes situés en surface pour l'amenée d'air frais dans le fond au travers des puits et descenderies et pour le retour de l'air issu des travaux et de l'exploitation par l'intermédiaire des gaines et puits. Le domaine de fonctionnement normal de la ventilation devra être suffisant pour permettre de maintenir l'installation en exploitation sûre.

Températures extrêmes

Comme précédemment, la ventilation sera conçue pour permettre un fonctionnement normal dans une plage de température en surface comprise en -15°C et +35°C. Si nécessaire, des dispositions permettant de réguler ponctuellement une élévation ou baisse de la température pourront être placées sur les systèmes de ventilation et mises en service sur déclenchement des moyens de surveillance associés aux systèmes de ventilation (mesures de température, de pression, de débit…).

Intempéries

Les installations en interface avec la surface sont conçues pour prévenir tout incident ou accident en lien avec des conditions météorologiques dégradées telles que des pluies importantes, du verglas, une tempête… Pour cela, la conception des installations de transfert et souterraines qui sont en interface avec la surface prévoit des zones protégées des intempéries par la construction de bâtiments. Aucune opération de transfert des colis de stockage entre les installations de surface et les installations assurant la liaison surface/fond n'est réalisée par l'extérieur des bâtiments.

Foudre

Les installations de transfert et souterraines seront protégées des effets directs et indirects de la foudre en fonction de leur localisation, des équipements installés et des activités réalisées.

3.4.4.5 Inondation externe

Origine du risque

Le choix du site d'implantation des installations souterraines permet de limiter le risque d'inondation externe. A la profondeur de 500 m, le site retenu présente des couches d'argile où les flux d'eau circulant sont très limités du fait des niveaux de perméabilité très faibles. Ce risque semble donc très faible pour les installations souterraines.

Le principal risque identifié concerne les liaisons entre la surface et le fond. En effet, les ouvrages de liaison traversent des formations calcaires qui sont aquifères. Ces ouvrages sont des puits verticaux et des galeries inclinées qui peuvent drainer les eaux jusqu'au fond des installations.

La venue d'eau au niveau des colis placés dans les alvéoles de stockage est différente en fonction de la zone considérée :

- Au niveau des alvéoles MAVL, la présence de la ventilation en phase d'exploitation empêche l'arrivée d'eau au niveau des colis ;
- Au niveau des alvéoles HA, le chemisage des alvéoles est constitué de tronçons dont les jonctions sont recherchées étanches, sans garantie de cette étanchéité sur la période d'exploitation séculaire. Les alvéoles ne sont pas ventilées. Deux hypothèses sont retenues :
  - ✓ Les jonctions sont étanches. L'eau présente dans le milieu géologique ne peut venir au contact des colis ;
  - ✓ Les jonctions ne sont pas étanches. L'eau présente dans le milieu géologique vient au contact des colis.

Pour les alvéoles HA, quel que soit le niveau d'étanchéité du chemisage, l'eau provenant du milieu géologique est drainée jusqu'à la galerie d'accès et collectée.

Dispositions

Les différentes couches géologiques à traverser pour atteindre la couche d'argile comprennent des niveaux perméables qui peuvent le cas échéant être productifs. S'ils le sont effectivement, leur traversée nécessite des dispositions constructives pour réaliser une étanchéité à ces niveaux. Celles-ci ont été testées dans le Laboratoire souterrain et le retour d'expérience sera utilisé[42]. En cas de défaillance ou de rupture des étanchéités réalisées au niveau des différentes couches géologiques, une arrivée d'eau dans les installations souterraines en provenance des aquifères sus-jacents aux argilites, est possible au cours de l'exploitation des puits et des descenderies.

Des dispositifs (puisards, rétentions) seront disposés aux points bas des différents puits et descenderies constituant les ouvrages de liaison afin de collecter les éventuelles eaux externes. Ils sont couplés à des alarmes de détection de niveau reportées en salle de contrôle. En cas de détection de présence d'eau, les moyens mis en œuvre permettent de limiter l'inondation par des moyens de pompage mobiles et autonomes.

Concernant l'eau provenant éventuellement des alvéoles HA, sa gestion consistera à la drainer de façon gravitaire jusque dans la galerie d'accès et à la collecter dans des rétentions adaptées à la quantité prévisible de venue d'eau. Des dispositions techniques et organisationnelles permettant la gestion de l'eau provenant du milieu géologique seront à mettre en œuvre. Les incertitudes sur l'étanchéité du chemisage conduisent à collecter une eau ayant été au contact des colis. Bien que les colis de stockage présentent une très faible contamination surfacique labile, ces effluents sont à considérer comme des déchets liquides douteux qui feront l'objet de contrôles et de caractérisation pour identifier leur exutoire après transfert vers les installations de surface.

3.4.4.6 Installations environnantes et voies de communication terrestres (incendie externe, explosion extérieure aux installations)

La RFS I.1.b s'applique à des installations nucléaires de surface. Pour les installations souterraines et la liaison surface/fond, elle n'est pas applicable. Concernant les parties émergentes de la liaison surface/fond, les installations seront analysées au même titre que les installations de surface (cf. chapitre 2). Les dispositions à prendre vis-à-vis d'une explosion ou d'un incendie externe seront adaptées à l'occurrence de cette situation, notamment au regard de la présence limitée de la hotte contenant un colis de stockage dans les installations de transfert surface/fond.

3.4.4.7 Risques d'origine humaine

Origine du risque

Les risques d'origine humaine concernent l'intrusion dans les installations et les actes de malveillance. Les installations de transfert et souterraines sont reliées avec les installations de surface en fonction de l'implantation des puits d'accès et de retour d'air, des descenderies, des installations de surface dédiées à l'exploitation nucléaire et celles en support aux travaux.

Dispositions

Les dispositions vis-à-vis de ces risques sont celles retenues dans les installations de surface (cf. chapitre 2) complétées au fond de dispositions permettant :

- d'empêcher l'accès à toute personne non autorisée dans les installations nucléaires du fond notamment depuis la zone centrale, ces accès étant gardés et contrôlés ;
- de déclencher une alarme à l'ouverture d'une porte gardiennée, alarme reportée au poste de commandement de l'installation et au poste de sécurité du site.

Il faut noter que le fait d'être en souterrain à une profondeur supérieure à 500 mètres protège implicitement les installations et limite l'occurrence d'intrusions dans les installations.

[42] Calcaires du Barrois, productifs ou non selon les circulations karstiques ; autres formations aquifères à l'échelle du Bassin Parisien, non productives à l'emplacement des puits du Laboratoire.

3.4.5 Risques spécifiques aux installations du stockage

Comme indiqué dans le chapitre 2, la spécificité du stockage concerne la durée de la phase d'exploitation qui est estimée égale ou supérieure à 100 ans (durée minimale requise par la loi au titre de la réversibilité) et à laquelle se greffe la prise en compte de la réversibilité. Ces spécificités peuvent être à l'origine de risques non retenus habituellement dans des installations nucléaires en cours d'exploitation et pour lesquels des dispositions de conception doivent être retenues au regard de la maîtrise de la sûreté des installations.

La prise en compte de ces éléments fait émerger différents risques et situations pour lesquels une première analyse est succinctement présentée. Il s'agit des risques associés au vieillissement des installations associé à la durée de la réversibilité. Les situations particulières à étudier concernent la perte de maîtrise technique correspondant à une absence du personnel d'exploitation, une équipe de gardiens assurant une maintenance minimale, et l'étude d'un abandon de l'installation.

3.4.5.1 Le vieillissement des installations, équipements et colis

Installations

Les ouvrages des installations de transfert et souterraines seront conçus en tenant compte des exigences associées à la durée de l'exploitation. Le dimensionnement des différentes zones dépendra de leur accessibilité qui permet de prévoir des opérations de maintenance préventive, un programme de surveillance et éventuellement des actions curatives.

Ainsi, le revêtement des différents ouvrages (puits, galeries, alvéoles) est conçu pour assurer leur stabilité mécanique pendant une durée *a minima* séculaire. À l'image des tunnels de génie civil, le revêtement est dimensionné pour assurer aux galeries une durée de vie d'ordre séculaire avec un entretien minimum.

Les alvéoles de stockage ont une durée d'exploitation beaucoup plus courte que les puits et galeries. Cependant, elles ne sont plus accessibles lorsqu'elles contiennent des colis et les contraintes de réversibilité nécessitent de pouvoir assurer le retrait des colis durant la phase de réversibilité. Les alvéoles MAVL sont donc conçues pour répondre au besoin de stabilité mécanique de l'ouvrage laissé sans maintenance pendant une durée *a minima* séculaire. Les alvéoles HA sont dimensionnées pour que le chemisage protège les colis du risque de chargement géomécanique hétérogène pendant la phase thermique. En assurant cette fonction, qui se traduit par une exigence de tenue mécanique sur une durée millénaire, le dimensionnement du chemisage permet également de préserver les jeux de manutention autour du colis nécessaire pour un éventuel retrait pendant une durée *a minima* séculaire.

Equipements

Les équipements utilisés pour le transfert des colis et la mise en alvéole sont des véhicules de transfert et des équipements de manutention mobiles qui peuvent faire l'objet d'une maintenance et d'un remplacement aisé tout au long de l'exploitation. La difficulté principale concerne le vieillissement des équipements fixes implantés dans les installations du fond tels que des rails, des gaines de ventilation, des câbles, des capteurs… Le choix de matériels durables, passifs et robustes est privilégié. La conception devra permette une maintenance aisée et le remplacement des matériels défectueux. Leur capacité à évoluer face à des situations non prévues à la conception et à s'adapter aux moyens industriels du futur (évolutions des technologies pour le contrôle commande, la conduite à distance…) sera un critère choix important.

Colis

Les performances des colis de stockage doivent être assurées sur une durée séculaire afin de faciliter leur reprise éventuelle dans le cadre d'une exigence de réversibilité. Les conditions de son environnement font l'objet d'un programme de surveillance afin de conforter les évolutions des alvéoles et des colis dans le temps, base de la démonstration de sûreté en exploitation et après fermeture.

Tous composants

Les exigences de conception des ouvrages, équipements et colis associées au vieillissement des composants du stockage sont prises en compte dès la conception. Les actions de surveillance mises en place permettront de suivre l'évolution de ces composants. Ces résultats seront exploités de façon régulière afin d'interagir sur les actions de maintenance et les éventuelles reprises de conception. De manière cohérente avec les pratiques des autres INB, des réexamens de sûreté des installations du stockage seront réalisés à une fréquence de 10 ans. Ils présenteront le retour d'expériences de l'exploitation des installations et la synthèse des actions de surveillance. Ces éléments préciseront les éventuels écarts sur l'évolution de certains composants, les dispositions palliatives envisagées et les éventuelles modifications prévues dans les installations.

3.4.5.2 La perte de maîtrise technique

Le contexte politique et social étant difficilement prévisible sur des périodes supérieures à 120/150 ans, il est nécessaire de s'interroger sur les dispositions à mettre en œuvre au niveau des installations souterraines pour couvrir une situation particulière considérant une perte momentanée des structures étatiques. Au regard des expériences passées, l'occurrence d'un scénario de ce type est très faible. Toutefois, sur une durée d'exploitation séculaire des installations, des dispositions doivent permettre de garantir la mise en sûreté des installations sur une période réduite.

Le scénario envisagé pourrait correspondre à une perte de la maîtrise de l'exploitation des installations associée à une crise sociétale. Les installations font l'objet d'un gardiennage dédié à la surveillance physique du site (pas d'intrusion, surveillance radiologique des installations) et à quelques opérations de maintenance.

La réduction des risques associés à cette perte de maîtrise technique pourra être anticipée au cours des réexamens périodiques de sûreté des installations du stockage qui sont réalisés tous les 10 ans. En effet, lors de cette instruction, la mise en œuvre de dispositions adaptées à cette situation pourra être envisagée, telle que la fermeture des ouvrages de stockage.

L'analyse préliminaire de cette situation permet d'identifier les zones de l'installation dans lesquelles des dangers seraient à maîtriser. Il s'agit essentiellement de la zone de stockage des colis de déchets MAVL si la ventilation des alvéoles ne peut être garantie. Les risques associés sont une augmentation de la teneur en gaz radioactifs et explosifs dans cette zone. Concernant la zone HA, les colis sont étanches. En l'absence de ventilation, la température dans les galeries augmente mais sans atteindre des valeurs susceptibles de conduire à des situations accidentelles.

Afin de minimiser les conséquences d'une telle situation, les opérations de transfert et de mise en alvéole en cours sont terminées, des dispositions particulières de mise en sécurité des installations sont réalisées. Dans le cas des alvéoles MAVL, il pourra être utile de prendre des dispositions complémentaires vis-à-vis de la présence de gaz radioactifs et explosifs.

La conception des installations doit privilégier la mise en place de dispositions aussi robustes que possible. Les principes directeurs retenus à la conception privilégient :

- Des composants simples et passifs pour le fonctionnement des installations ;
- Une maintenance réduite des équipements et installations sans que l'absence de maintenance sur une durée limitée ne conduise à des situations accidentelles graves ;
- Une maintenance et surveillance réduites sur une durée limitée sans engendrer une dégradation des installations ;
- Des colis de stockage en béton ou en acier qui sont soumis à une dégradation ou une corrosion très lente, ce qui permet de conserver l'intégrité des colis à l'issue de la période.

La reprise de l'exploitation des installations après cette période sera facilitée si les dégradations associées à cette situation sont réduites. De plus, la traçabilité des informations concernant l'historique de l'exploitation (modifications et évolution des installations, faits marquants, plans, résultats de la surveillance), les caractéristiques des déchets reçus, conditionnés et stockés, permettra de disposer de tous les éléments nécessaires. Cette traçabilité peut être garantie par un double archivage dans des lieux géographiquement séparés.

Une situation de ce type n'est pas considérée dans le dimensionnement des structures et équipements. Les dispositions complémentaires évoquées dans cette partie seront développées dans le cadre de l'élaboration du plan d'urgence interne.

3.4.5.3 L'abandon de l'installation

L'abandon des installations n'est pas pris en compte dans le référentiel de sûreté d'installations nucléaires de base destinées à fonctionner sur plusieurs décennies. Comme précédemment, une situation d'abandon des installations est considérée comme une situation hors dimensionnement. En complément des éléments développés dans la section précédente, l'abandon éventuel des installations devra s'accompagner d'opérations de mises en sécurité/sûreté et notamment la fermeture des installations souterraines. Celles-ci seraient similaires aux opérations de fermeture des installations envisagées dans le cadre de phase après fermeture du stockage. La différence de cette situation avec le scénario normal d'évolution se situe sur le nombre et la performance des éléments de fermeture (scellements, remblais) mis en place avant l'abandon du stockage. L'acceptabilité de cette situation est estimée dans le chapitre 4.

3.5 Situations de dimensionnement et hors dimensionnement

La démarche de justification de la conception des installations du stockage de déchets HA et MAVL s'appuie sur l'étude des situations de fonctionnement normal, incidentel et accidentel auxquelles l'installation peut être confrontée, afin de vérifier le respect des objectifs de sûreté.

La vérification du bon niveau de sûreté des installations sera réalisée ultérieurement pour la demande d'Autorisation de Création par :

- La vérification du caractère représentatif et enveloppe des situations de dimensionnement ;
- L'analyse détaillée des séquences accidentelles jugées représentatives ;
- L'étude de l'impact radiologique des opérations d'exploitation et de maintenance.

La démarche suivie pour l'identification de ces situations est décrite dans le chapitre 1.

Cette section présente les situations de dimensionnement et hors dimensionnement identifiées pour la conception des installations à ce stade.

3.5.1 Situations de dimensionnement

Les situations résultent de l'analyse des risques conduite dans la section 3.4 et correspondent à l'état de la connaissance des installations et des opérations.

3.5.1.1 Transfert surface/fond

Véhicule de transfert en descenderie

Il s'agit :

- De la collision du véhicule et/ou de la hotte avec des obstacles dans la descenderie pouvant conduire :
  - ✓ à un choc frontal ou latéral du véhicule avec une vitesse de fonctionnement nominale majorée (survitesse) ;
  - ✓ à un incendie ;
- D'un incendie au niveau du véhicule de transfert ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

Funiculaire en descenderie

Il s'agit :

- Du non arrêt du funiculaire en station basse avec une vitesse de fonctionnement nominale majorée (survitesse),
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

Puits et cage

Il s'agit :

- Du non arrêt de la cage en fond de puits avec une vitesse de fonctionnement nominale majorée (survitesse) ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

3.5.1.2 Transfert dans le fond

Transfert jusqu'au module de stockage

Il s'agit :

- De la collision d'une hotte posée sur ses pieds dans la zone d'échange par un véhicule de transfert ou une navette ;
- De la collision entre deux véhicules dans la zone centrale ou la zone d'échange ;
- D'un incendie au niveau du véhicule de transfert ou de la navette ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

Transfert jusqu'à l'alvéole de stockage

Il s'agit :

- De la dérive de la navette HA sur pneus conduisant à une collision avec le robot pousseur, les operculaires ;
- D'un incendie au niveau de la navette HA sur pneus ;
- D'un incendie au niveau de la navette sur rails (HA et MAVL) ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

3.5.1.3 Accostage et mise en alvéole de stockage MAVL

Les situations de dimensionnement au niveau de la zone d'accostage sont :

- Un défaut d'accostage (voire un désaccostage) de la hotte positionnée sur la paroi séparant la zone d'accostage de la cellule de manutention pouvant conduire à une exposition externe du personnel ;
- Un incendie au niveau de la navette sur rails.

Les situations de dimensionnement identifiées dans la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole sont présentées ci-après pour chaque système de manutention étudié.

Chariot à fourches

Il s'agit :

- De la chute d'un colis de faible hauteur (150 mm) dans la cellule de manutention et pendant le transfert en alvéole ;
- D'un incendie au niveau des équipements de la cellule de manutention impliquant un colis de stockage ;
- D'un incendie au niveau du chariot lors du transfert en alvéole impliquant un colis de stockage ;
- De la perte de la ventilation forcée dans les alvéoles ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

Pont gerbeur

Il s'agit :

- De la chute de faible hauteur ou collision du colis suite à une mauvaise mise en configuration de la cellule de manutention pour le stockage de la couche n+1 ;
- De la collision du colis par la porte supérieure séparant la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole de stockage ;

- D'un incendie au niveau des équipements de la cellule de manutention impliquant un colis de stockage ;
- D'un incendie au niveau du pont lors du transfert en alvéole impliquant un colis de stockage ;
- De la perte de la ventilation forcée dans les alvéoles ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

Chariot Pré-empilage

Il s'agit :

- De la chute d'un colis de 150 mm dans la cellule de manutention (lâcher de charge intempestif, rupture de la chaine de levage) ;
- Du basculement de la pile de colis suite à un arrêt franc du chariot pendant le transfert en alvéole ;
- De la collision de la pile de colis avec les piles en fond d'alvéole ou le fond d'alvéole suite au non arrêt du chariot ou à une mauvaise cartographie des colis en place ;
- D'un incendie au niveau des équipements de la cellule de manutention impliquant une pile de colis de stockage ;
- D'un incendie au niveau du chariot lors du transfert en alvéole impliquant la pile de colis de stockage ;
- De la perte de la ventilation forcée dans les alvéoles ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

3.5.1.4 Accostage et mise en alvéole de stockage HA

Les situations de dimensionnement au niveau de la zone d'accostage et lors de la mise en alvéole sont :

- Un défaut d'accostage (voire un désaccostage) de la hotte positionnée sur l'operculaire de l'alvéole pouvant conduire à une exposition externe du personnel ;
- Un incendie au niveau de la navette sur rails ;
- Un incendie au niveau du robot pousseur au contact du colis lors de sa mise en alvéole ;
- Un coincement du colis de stockage entre la hotte et l'alvéole (perte d'un patin de glissement) ;
- De l'occurrence d'un séisme inférieur ou égal au séisme majoré de sécurité.

3.5.2 Situations hors dimensionnement

Les situations jugées hors dimensionnement en appliquant la démarche d'analyse présentée au chapitre 1 sont définies à partir des situations accidentelles de dimensionnement identifiées dans la section 3.5.1 en appliquant des défaillances aggravantes supplémentaires indépendantes de l'événement initiateur. Le but de cette démarche est de vérifier que la dégradation des fonctions de sûreté est progressive. De manière générique, les situations hors dimensionnement concernent :

- Une collision du véhicule ou de la hotte avec une survitesse supérieure à la vitesse de dimensionnement retenue ;
- Une chute de colis d'une hauteur supérieure à celle retenue pour le dimensionnement ;
- Un incendie se propageant à un deuxième colis ou une deuxième pile de colis avant d'être maîtrisé grâce aux moyens d'extinction et d'intervention mis en place.

Deux situations spécifiques au stockage en raison de la durée de sa phase d'exploitation (cf. sections 3.4.5.2 et 3.4.5.3) sont considérées comme hors dimensionnement :

- La perte de maîtrise technique durant l'exploitation du stockage correspondant à un abandon partiel des installations pendant plusieurs années ;
- L'abandon des installations du stockage.

3.6 Dispositions adoptées en vue de la fermeture des installations

Les installations souterraines ne font pas l'objet d'un démantèlement au sens des installations de surface. Cependant, le stockage est conçu pour pouvoir être fermé et des dispositions sont prises pour cette fermeture au niveau des ouvrages de stockage, des galeries, des puits et descenderies. La

fermeture met le stockage en situation d'assurer passivement sur le très long terme ses fonctions de sûreté pour protéger les personnes et l'environnement d'une dissémination des substances radioactives et toxiques contenues dans les déchets.

Les ouvrages de fermeture sont de deux types, avec des rôles différents : d'une part, un remblayage des galeries courantes et, d'autre part, des ouvrages localisés de faible perméabilité, les scellements.

Les principes généraux de conception du remblai et des scellements ainsi que leur positionnement pour la fermeture du stockage sont rappelés succinctement ci-après :

- L'ensemble des liaisons surface/fond (puits ou descenderies) est scellé. Dans le cas de descenderies, les scellements sont réalisés dans le sens de la contrainte horizontale majeure, si nécessaire.
- Toutes les galeries de liaisons reliant la zone centrale aux différentes zones de stockage sont scellées. Si nécessaire, ces scellements sont orientés dans le sens de la contrainte horizontale majeure.
- Le scellement de la zone MAVL par bouchons d'argile est réalisé dans des tronçons de galeries orientés si nécessaire parallèlement à la contrainte horizontale majeure. Les scellements situés de part et d'autre des alvéoles de stockage (dans la galerie d'accès et dans la galerie d'extraction d'air « alvéoles ») assurent le fractionnement au niveau des sous-zones. Il n'y a pas de scellements dans les galeries de liaison secondaires. Les scellements situés dans les galeries de liaison principales permettent de séparer la zone MAVL des autres installations du stockage.
- Indépendamment des bouchons d'argile placés de manière systématique en tête de chaque alvéole HA, des scellements sont mis en place dans les deux galeries de liaison secondaires, si nécessaire parallèles à la contrainte horizontale majeure.
- La base des puits et les galeries afférentes sont remplies de béton.
- Les ouvrages souterrains sont remblayés en cherchant un remplissage intégral de la galerie et une portance (rigidité) initiale suffisante. Les remblais seront à base d'argilite excavée.

Pour mener à bien ces opérations de fermeture, les conditions de sécurité des personnes seront réunies en vue de limiter les risques présents. En dehors des risques de sécurité classique, les aspects liés à la radioprotection de ces personnes sont pris en compte dès la conception. En effet, la mise en œuvre d'écrans de protection pour limiter l'exposition aux rayonnements des personnes est prévue préalablement aux opérations de démontage des équipements. C'est le cas notamment pour les équipements de la cellule de manutention des alvéoles MAVL et de l'operculaire pour les alvéoles HA. Pour la zone MAVL, les opérations de fermeture prennent en compte les risques d'explosion liée à la présence de gaz explosifs en provenance des colis de stockage au travers de modes opératoires (cf. section 3.4.3.5).

3.7 Gestion des déchets et effluents

Pendant la phase d'exploitation, l'installation génère des volumes faibles d'effluents liquides et gazeux, ainsi que de déchets solides.

En situation normale les effluents et déchets produits par l'installation sont à priori de type FA ou TFA.

3.7.1 Effluents liquides

En plus des effluents issus du ruissellement dans les galeries et puits des eaux du massif, les effluents liquides qui pourraient être produits par l'installation sont :

- les effluents de lavage des différents locaux situés en zone contrôlée (effluents dits « suspects ») ;
- les effluents de décontamination éventuelle des hottes de transfert dans une zone dédiée au fond si la nécessité de disposer d'un local pour ce type d'opérations est apportée (ces opérations seront privilégiées dans les installations de surface) ;
- les effluents de collecte des eaux en provenance des alvéoles de stockage le cas échéant ;
- les effluents issus des opérations de maintenance des engins de manutention et de transfert des colis.

Les effluents issus des opérations d'exploitation et les eaux issues, le cas échéant, des alvéoles HA seront collectés dans des cuves dites « actives » ou « suspectes » suivant le niveau de radioactivité. Les réseaux de collecte de ces effluents seront étudiés pendant la phase de définition du projet.

Un réseau de collecte des effluents issus de la récupération des eaux d'infiltration sera prévu.

Un système séparatif des eaux en fonction de sa provenance pourra être choisi :

- un réseau de collecte, récupérant les eaux au bas de la descenderie, puits et galeries de la zone en construction ou en appui de la zone nucléaire ;
- Un réseau de collecte, récupérant les eaux au bas de la descenderie, colis, des puits de ventilation et galeries de la zone en exploitation ;
- un réseau de collecte inférieur recueillant les eaux au bas des alvéoles de stockage MAVL.

La distribution des eaux d'infiltration serait répartie ainsi car certaines eaux peuvent potentiellement être contaminées en cas de défaillance accidentelle d'un ou plusieurs colis.

La collecte des eaux se fait par des caniveaux de façon gravitaire. Leur évacuation jusqu'à la surface diffère en fonction de sa provenance. Il peut s'agir soit d'un système de relevage par tuyauteries, soit de cuves spécifiques remontées à la surface pour un traitement dédié.

3.7.2 Effluents gazeux

Les effluents gazeux proviennent essentiellement du dégazage des colis primaires présents dans les colis de stockage. Ils sont produits pendant toutes les phases de vie de l'installation. En phase d'exploitation, ils constituent un rejet « chronique ». Les rejets, évalués dans la section 3.4.2.1, sont de l'ordre de 4 μSv/an à 500 mètres du point de rejet.

3.7.3 Déchets solides

L'installation produit plusieurs types de déchets solides radioactifs :

- déchets « technologiques » ;
- déchets de « procédé » issus de l'exploitation des alvéoles et des réseaux de ventilation.

Les déchets solides appelés usuellement « déchets technologiques » sont essentiellement issus de l'exploitation des installations de transfert et de mise en alvéole des colis de stockage. Ils peuvent être collectés en sacs, mis en fûts et évacués en conteneurs vers un centre de stockage tel que le CSFMA ou le CSTFA pour compactage et blocage en caisson métallique.

Les déchets de « procédé » sont constitués des filtres éventuellement mis en place ainsi que des équipements usés suite à leur utilisation normale ou détériorés par un dysfonctionnement.

3.7.4 Gestion des déchets

3.7.4.1 Zonage déchets

Le zonage déchets permet de limiter la quantité de déchets générés. Le zonage déchets différencie les locaux engendrant des déchets conventionnels de ceux générant des déchets nucléaires (ou catégorisés comme tels). La classification des zones se fait à partir de la conception de l'installation et en regard de la directive Euratom 96/29.

Conformément à l'arrêté du 31/12/99, le zonage employé est décrit dans le Tableau 3.7 1 suivant :

Tableau 3.7-1 Classification du zonage déchets

Classification	Description	Déchets en sortie
Zone Contaminante (ZC)	Locaux qui sont normalement contaminés ou activés	Déchets radioactifs par défaut
Zone Non Contaminante (ZNC)	Locaux contenant ou ayant contenu des sources radioactives, absence d'activation.	Déchets conventionnels par défaut, déchets radioactifs prédéfinis par conception
Zone à Déchets Conventionnels (ZDC)	Locaux étrangers à l'utilisation de substances radioactives.	Déchets conventionnels par défaut

3.7.4.2 Zonage déchets des installations

Les installations souterraines sont constituées de zones et de locaux dans lesquels les substances radioactives sont les colis de stockage en transit depuis les installations de surface jusqu'au droit des alvéoles de stockage. Ces zones ne présentent pas de contamination en fonctionnement normal et peuvent être classées comme non contaminantes. Les déchets qui en sortent sont donc des déchets conventionnels.

Pour ce qui concerne les alvéoles de stockage, elles ne produisent pas de déchets spécifiques. Néanmoins, les déchets éventuels issus de ces zones ne devraient pas être des déchets radioactifs tant qu'aucun défaut sur les colis n'est détecté sur la durée de l'exploitation des installations.

La cellule de manutention dédiée à la préparation des colis MAVL pour leur transfert dans la partie utile de l'alvéole de stockage est une zone non contaminante qui ne produira que des déchets conventionnels.

Au cours de la durée de l'exploitation des installations, estimée de l'ordre de la centaine d'année, les évolutions des installations et des colis associées notamment à leur vieillissement pourront faire évoluer le zonage déchet décrit précédemment.

4

Options de sûreté des installations souterraines en phase après fermeture

4.1	*Préambule*	*256*
4.2	*Rappel de la démarche*	*257*
4.3	*Options de sûreté après fermeture et de conception des installations souterraines*	*258*
4.4	*Maîtrise des incertitudes et robustesse du stockage*	*283*
4.5	*Scénarios*	*314*
4.6	*Performances à long terme des options de conception au stade de 2009*	*323*

4.1 Préambule

Dans le cadre du Dossier 2005 (Andra, 2005c), l'Andra a présenté les résultats des études de sûreté à long terme d'un stockage géologique profond.

Sur la base d'options de conception retenues au stade de la faisabilité, l'évaluation de sûreté après fermeture menée dans le cadre de ce dossier a notamment montré que les objectifs de protection étaient respectés.

Dans une démarche prudente et afin de garantir la robustesse du stockage, l'Andra a exploré les dysfonctionnements possibles du système de stockage (défauts de scellements, défauts de colis), et la possibilité d'intrusions humaines (forage pénétrant dans le stockage en divers endroits). Les évaluations quantitatives ont été effectuées en prenant des valeurs enveloppes parmi l'ensemble des possibles au regard de l'état des connaissances.

Les solutions en termes de choix d'architecture proposées au stade de 2005 ne prétendaient pas être optimisées. Le positionnement du stockage était arbitrairement fixé au droit du laboratoire souterrain, à l'intérieur d'une zone de 250 km^2.

Au moyen de divers indicateurs, l'analyse du Dossier 2005 a montré que les trois fonctions de sûreté principales (« s'opposer à la circulation de l'eau », « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage », « retarder et atténuer la migration des radionucléides ») étaient remplies efficacement par les options de conception envisagées. Elle a souligné que ce constat valait non seulement en situation normale, représentative des évolutions les plus probables, mais aussi dans des configurations nettement plus pénalisantes. En particulier, le régime de transport dans et autour du stockage demeure diffusif, y compris dans des conditions très dégradées par rapport à toutes les observations et mesures actuelles sur les propriétés du milieu géologique. De plus, la prise en compte de scénarios de type altéré ne remet pas en cause cette conclusion.

Au terme des calculs effectués dans le cadre du scénario d'évolution normale (SEN), les performances du stockage et de ses composants répondent aux objectifs de dose recommandés par le guide de sûreté de l'ASN (ASN, 2008) (ex RFS.III.2.f). De manière générale, les scénarios altérés n'entraînent qu'une augmentation modeste de la dose à l'exutoire.

De manière plus précise, les impacts engendrés par les déchets HA et les colis de moyenne activité à vie longue (déchets MAVL) même en scénarios altérés, se situent plusieurs ordres de grandeur au-dessous de la limite fixée par le guide (0,25 mSv par an) pour le SEN.

Lors de l'instruction du Dossier 2005 par les différents évaluateurs, un ensemble de remarques a été formulé. Sur la base de ces recommandations et de revues internes menées en 2006, des évolutions de conception sont proposées entraînant des modifications en termes d'architecture de stockage depuis le Dossier 2005 (cf. chapitre 1). Elles se résument par :

- l'implantation d'une descenderie double tube et déroulée,
- l'implantation centrée du groupe de puits principal, et l'implantation faiblement excentrée d'un puits de retour d'air dans la zone de déchets MAVL,
- la mise en place d'alvéoles de déchets MAVL passantes présentant un raccordement à une galerie de retour d'air,
- une modification des longueurs et diamètres des alvéoles MAVL (longueur augmentée, diamètre diminué),
- le maintien du chemisage en tête d'alvéole de déchets HA.

L'architecture proposée à ce stade des options 2009 (illustrée ci-après en Figure 4.1-1) est une architecture à terminaison tenant compte de ces évolutions de conception et du modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et activité moyenne à vie longue, MID 2009 (Andra, 2009d).

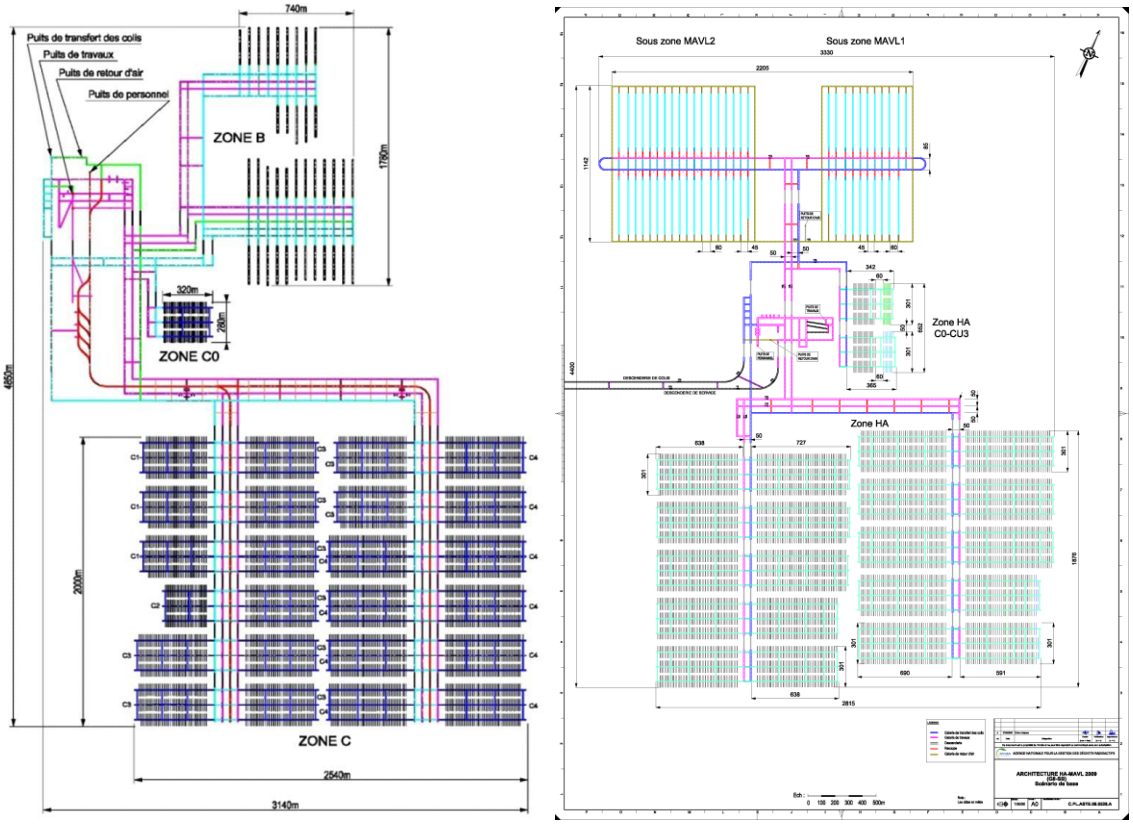


Figure 4.1-1 *Schémas illustrant l'évolution des architectures à terminaison entre 2005, scénario 1a (à gauche) et 2009 (à droite) pour le scénario de base.*

Les sections ci-après montrent en quoi les options de conception retenues au stade de 2009 apportent un niveau de sûreté à long terme équivalent à celles retenues pour le Dossier 2005.

Elles présentent les options de sûreté, puis rappellent en quoi les incertitudes sont maîtrisées et confortent les scénarios qui seront à prendre pour la DAC. La dernière section présente les évaluations quantitatives d'indicateurs relatives à cette nouvelle architecture, notamment pour montrer que les fonctions de sûreté sont satisfaites et que l'impact est très faible, avec une dose maximale potentielle significativement inférieure à 0,25 mSv/an soit 10% de l'impact de la radioactivité naturelle, valeur limite fixée par le guide de sûreté de l'ASN.

4.2 Rappel de la démarche

La démarche de sûreté reste dans la continuité de celle du Dossier 2005. Les évolutions de conception ont fait l'objet d'un réexamen ciblé sur les composants concernés, par une analyse qualitative et par une analyse quantitative se basant sur les indicateurs les plus pertinents vis-à-vis des fonctions à vérifier.

L'analyse qualitative de sûreté consiste donc pour le jalon 2009 à examiner ces évolutions et vérifier si celles-ci permettent de réduire les incertitudes non maîtrisées, et n'entraînent pas de nouvelles incertitudes (cf. section 4.4). Elle conduit à :

- revisiter pour chaque évolution de conception d'un composant les incertitudes levées et/ou les nouvelles incertitudes que pourraient impliquer ces évolutions,
- réexaminer, le cas échéant, en support aux options de sûreté, les modalités de gestion des incertitudes résiduelles, celles relevant d'hypothèses de calcul du scénario d'évolution normale (SEN) et des études de sensibilité, et celles relevant de scénarios d'évolution altérée (SEA) et de leurs études de sensibilité.

L'analyse est également amendée pour tenir compte de l'évolution des données d'entrée mises à jour :

- le modèle d'inventaire et de dimensionnement des colis (Andra, 2009d),
- les acquis de connaissance sur la zone de transposition (ZT), en particulier sur la formation hôte (Andra, 2009k),
- les acquis de connaissances issus du laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne (Andra, 2009g).

L'approche retenue pour l'analyse quantitative de sûreté est l'utilisation d'indicateurs intermédiaires comme le flux de radionucléides à la sortie de la formation hôte et en sortie des ouvrages de liaison surface fond pour vérifier le bon fonctionnement du système de stockage et s'assurer que les composants remplissent les fonctions de sûreté (cf. section 1.5 : définition des scénarios, et section 1.6 : résultats des analyses quantitatives de sûreté).

Comme pour le Dossier 2005, l'analyse est conduite sur le fonctionnement du stockage depuis sa fermeture jusqu'à 1 million d'années. En effet, à cette date, le pic de dose correspondant aux radionucléides pouvant sortir de la roche hôte est passé depuis plusieurs centaines de milliers d'années et les autres radionucléides ont disparu par décroissance radioactive sans sortir du Callovo-Oxfordien, à l'exception des chaines alpha à vie très longue, qui restent piégées chimiquement dans le Callovo-Oxfordien. Conduire l'analyse au-delà de cette date n'apporterait pas d'élément d'appréciation complémentaire sur la sûreté du stockage.

4.3 Options de sûreté après fermeture et de conception des installations souterraines

4.3.1 Fonctions de sûreté

Pour rappel, les fonctions de sûreté principales après fermeture du stockage (cf. chapitre 1) sont :

- isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines : il s'agit de mettre le stockage hors d'atteinte des phénomènes d'érosion et des intrusions humaines banales (en limitant par exemple la quantité de matériaux attractifs),
- s'opposer à la circulation d'eau : il s'agit de limiter le débit d'eau provenant des formations géologiques sus-jacentes, de limiter le débit d'eau dans la formation hôte, de limiter les flux d'eau dans les ouvrages du stockage, dans les alvéoles de déchets HA et les alvéoles de déchets MAVL,
- limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage : il s'agit de protéger les déchets HA vitrifiés de l'eau, de limiter la mise en solution des radionucléides et des toxiques des déchets vitrifiés HA, des combustibles usés CU3 et des déchets MAVL, et de limiter la mobilisation des radionucléides relâchés,
- retarder et atténuer la migration des radionucléides éventuellement relâchés hors des alvéoles de stockage. Il s'agit de limiter le flux longitudinal de radionucléides relâchés dans les ouvrages, de retarder et atténuer la migration de radionucléides dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien et de préserver la capacité naturelle de diffusion/dispersion des formations encaissantes,
- rester sous-critique (contrôle par la masse ou la géométrie par exemple).

Pour que la formation hôte puisse satisfaire ces fonctions de sûreté, cela conduit à des exigences de préservation des propriétés favorables de cette formation et de limitation des perturbations induites par le stockage qui se traduisent par des exigences de conception, de construction et d'exploitation (par exemple vis-à-vis de la zone endommagée), il s'agit de :

- limiter les sollicitations thermiques générées par la radioactivité des déchets (limiter les déformations irréversibles),
- préserver les propriétés mécaniques des argilites par un remplissage des ouvrages qui limite les vides et des moyens de creusement adaptés pour limiter l'extension de la zone endommagée au moment de la construction,
- préserver les propriétés chimiques de la formation hôte (limitation des interactions par le choix des matériaux rapportés afin qu'ils n'engendrent pas de dommages préjudiciables, et limitation de l'apport d'oxygène pendant la phase d'exploitation dans les alvéoles HA),

- préserver les propriétés hydrauliques et de transport (assurer la prédominance du transfert des radionucléides et des toxiques par diffusion dans la formation hôte).

Les expériences en laboratoire souterrain et la reconnaissance sur la zone de transposition ont confirmé les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité, capacité de rétention, propriétés géochimiques, environnement hydrogéologique) pour recevoir une installation de stockage de déchets radioactifs.

Les principes de conception retenus pour assurer l'accomplissement des fonctions de sûreté sont les suivants :

- un positionnement des puits et de la descenderie de manière à privilégier le transfert diffusif dans la formation hôte,
- un positionnement du stockage au milieu de la formation hôte pour bénéficier du maximum d'épaisseur de l'argilite du Callovo-Oxfordien (a minima 140 mètres sur la ZIRA), (Andra, 2009f),
- une architecture avec la pose de scellements multiples dans les différents ouvrages de liaison (puits, descenderies, galeries), ce qui permet une redondance en cas de défaillance des scellements d'un type d'ouvrage,
- une organisation du stockage en zones distinctes selon les types de colis (HA vitrifiés, CU et MAVL) séparées par une épaisseur d'argilite ; l'objectif visé est de limiter, voire de supprimer, les interactions thermiques et chimiques entre zones,
- des ouvrages limitant les perturbations mécaniques du milieu de manière à limiter l'extension de la zone endommagée,
- un dimensionnement des alvéoles de déchets HA permettant de limiter les effets thermiques sur la formation hôte liés aux colis de déchets exothermiques,
- un environnement physico-chimique favorable pour les colis de déchets en choisissant des matériaux compatibles avec la roche hôte et les colis de manière à privilégier le confinement à la source.

La sûreté est assurée de manière passive par la mise en place de dispositifs techniques et par les caractéristiques favorables de la formation hôte.

Les exigences à satisfaire par les différents composants du stockage dépendent des échelles de temps à considérer (cf. Chapitre 1).

Les principaux composants du stockage sont présentés individuellement avant de présenter l'architecture dans son ensemble. Pour chacun d'eux, les fonctions de sûreté à assurer sont données, celles-ci ayant guidé les options retenues (cf. Andra, 2009c).

Les colis et le milieu géologique constituent des données d'entrées importantes pour l'établissement des dispositions prises pour maîtriser la sûreté après fermeture et font l'objet d'une présentation plus détaillée.

4.3.2 Colis de stockage

4.3.2.1 Les colis de stockage de déchets HA

Les paragraphes suivants indiquent la contribution des colis de déchets HA aux fonctions de sûreté après fermeture :

- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :
  - ✓ le colis primaire, notamment la matrice de verre, doit limiter le relâchement des substances radioactives.
- Rester sous-critique :
  - ✓ la limitation en matières fissiles peut contraindre le nombre de colis primaires HA dans un colis de stockage.

Les exigences requises pour le colis de stockage pour garantir l'accomplissement de ses fonctions et de celles attribuées à la formation hôte sont décrites ci-après :

Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les colis de stockage :

- ✓ La conception des colis doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leur spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution dans le temps, et leur effets sur les fonctions à assurer.

  Le conditionnement des déchets doit permettre de limiter la dissolution des radionucléides. Pour les déchets vitrifiés HA, le verre est retenu comme matrice de confinement compte tenu de ses caractéristiques intrinsèques qui lui confère une durée de vie importante. Il est retenu un terme source de relâchement conservatif (actuellement, de durée d'environ 300 000 ans). De plus, la maîtrise du terme source dépend de la maîtrise des conditions d'environnement thermique, hydraulique, mécanique, chimique et radiologique (THMCR) dans l'alvéole. Elle renvoie à la nature des matériaux utilisés notamment pour le chemisage (pas de béton dans l'alvéole par exemple) et aux fonctions du système de fermeture de l'alvéole (paragraphe 4.3.4).

- ✓ Le surconteneur du colis de déchets vitrifiés HA doit protéger le verre d'une éventuelle arrivée d'eau pendant la phase dite « thermique » caractérisée par une température supérieure à 50°C.

  Ce surconteneur doit être conçu pour être étanche, sa durée d'étanchéité doit permettre d'éviter un relâchement de radionucléides aussi longtemps que la température ne permet pas de rendre compte, de manière fiable, du comportement des radionucléides, compte tenu des limites actuelles des connaissances (50°C) (cf. section 4.4.4.2).

  Pour garantir une étanchéité, la qualité de la soudure du couvercle doit être garantie et donc vérifiée avant sa mise en stockage (cf. Chapitre 2).

- ✓ Les couplages induits par la thermique du stockage, potentiellement importants, doivent être pris en compte et si nécessaire réduits par les dispositions de conception suivantes :
  - limiter la température des colis entrant dans le stockage,
  - espacer les colis, si nécessaire, par des intercalaires de conception similaire aux colis de stockage, pour ne pas dépasser la limite admissible sur l'argilite (T<90°C).

  Pour les architectures considérées (qui assurent une limitation à 90°C du pic thermique dans l'argilite), la durée de la phase thermique est de l'ordre du siècle pour les colis types C0 et de quelques siècles pour les colis types C1 ; elle pourrait être de l'ordre du millénaire pour les colis de type C6, déchets vitrifiés UOX-MOX-URE (Andra, 2009d).

Pour empêcher les transferts en ambiance thermique et maîtriser les effets de la température sur les spéciations et modes de migration des radionucléides, en réponse à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », la conception prévoit la mise en place d'un surconteneur en acier non allié (Figure 4.3-1) d'une épaisseur suffisante. En outre, l'épaisseur retenue inclut un dimensionnement lié à la réversibilité.

Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte :

- ✓ Limiter les sollicitations thermiques :
  - La densité de puissance thermique dans les alvéoles et au niveau de la zone de stockage (puissance thermique des colis, nombre des colis par alvéole) doit être limitée pour que la température de la roche hôte ne dépasse pas la limite admissible garantissant l'absence de phénomènes irréversibles.
- ✓ Limiter les perturbations radiolytiques :
  - L'épaisseur du surconteneur des colis HA doit réduire le débit de dose sur la roche à l'extrados du surconteneur, ce qui contribue à limiter la corrosion et ce faisant limite la production de gaz de radiolyse.
- ✓ Préserver les propriétés mécaniques :
  - La composition, la conception, la fabrication et le comportement à long terme du colis de stockage doivent minimiser la présence et la formation de vides résiduels dans l'alvéole de

stockage (vides entre le colis de stockage et l'alvéole et vides entre le colis de stockage et le colis primaire) et contribuer ainsi à limiter dans le temps les déformations dans la formation des argilites du Callovo-Oxfordien.

- ✓ Préserver les propriétés chimiques de sorption et de précipitation :
  - Les colis de stockage ne doivent pas être composés de matériaux susceptibles de dégrader les propriétés chimiques des argilites.
- ✓ Préserver les propriétés hydrauliques et de transport :
  - Les colis de stockage ne doivent pas être composés de matériaux susceptibles de dégrader les propriétés hydrauliques et de transport des argilites (ex : l'acier ne modifie pas ou peu la composition géochimique des eaux interstitielles).
  - Les colis de stockage participent à cette fonction en assurant une tenue mécanique qui permet de limiter l'extension de la zone endommagée.

Description de l'option retenue : le surconteneur

Tel que mentionné au chapitre 2, le surconteneur est constitué d'une virole en acier non allié de 55 mm d'épaisseur. Le colis de stockage est doté de patins en céramique inerte évitant un contact direct acier/acier entre le surconteneur et le chemisage des alvéoles de stockage (notamment pour éviter un effet galvanique). Pour répondre à l'exigence sur la limitation de l'endommagement de la roche, l'épaisseur du patin est limitée afin de réduire les jeux fonctionnels et donc minimiser les vides.

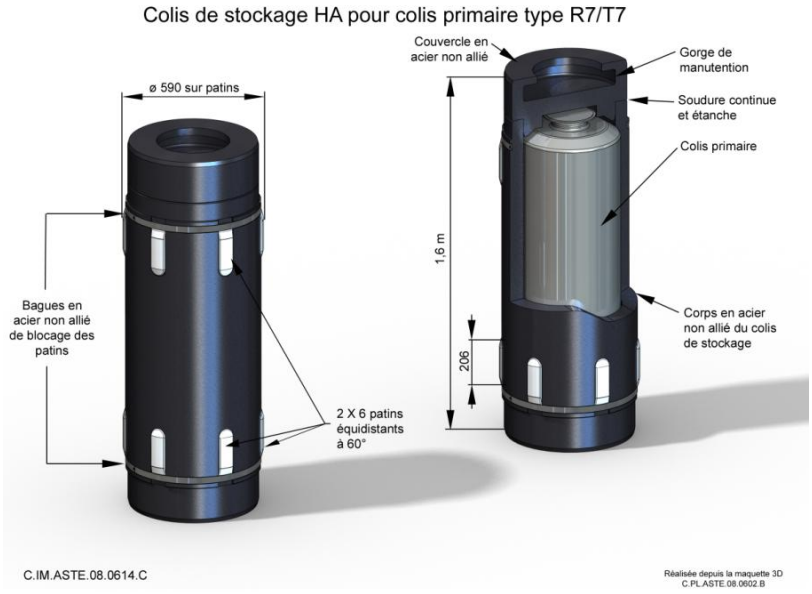


Figure 4.3-1 Schéma illustrant un colis de stockage de déchets HA

L'épaisseur d'acier devra permettre :

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

L'épaisseur d'acier retenue (au stade actuel 55 mm) devra couvrir l'ensemble des colis types exothermiques. Pour certaines catégories de colis, moins irradiants et moins exothermiques, comme par exemple les colis de type C0 et CU3, l'épaisseur pourra être moindre.

La maîtrise des conditions d'environnement du surconteneur est nécessaire pour que ce composant puisse remplir ses fonctions sur la durée requise. Elle renvoie donc aux fonctions du système de fermeture de l'alvéole qui comprend un bouchon métallique (ou capot d'étanchéité), un bouchon argileux et un bouchon en béton (section 4.3.4.4).

4.3.2.2 Les colis de stockage de déchets MAVL

Les paragraphes suivants présentent les fonctions de sûreté des colis de stockage MAVL et les exigences de sûreté vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte :

- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :
  - ✓ Le colis de stockage contribue à générer un environnement chimique favorable à l'immobilisation dans l'alvéole des substances radioactives.
- Rester sous-critique :
  - ✓ Le nombre de colis primaires dans un colis de stockage doit être limité pour que la masse critique ne soit pas dépassée de façon à garantir l'absence de risque de criticité à l'intérieur du colis de stockage en phase après fermeture.

Les exigences requises pour le colis de stockage pour garantir l'accomplissement de ces fonctions et de celles attribuées à la formation hôte sont les suivantes :

<u>Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les colis de stockage</u>

- ✓ La conception du colis de stockage doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution du déchet dans le temps…) et leur effet sur les fonctions à assurer.

  Le conditionnement, les taux de vide, la présence d'organiques, de complexants, le relâchement de gaz et les propriétés intrinsèques des colis de stockage sont les caractéristiques prépondérantes dans le choix des options de conception afin d'assurer l'accomplissement des fonctions de sûreté en phase après fermeture.

- ✓ Le conditionnement des déchets doit permettre de limiter la dissolution des radionucléides. Un environnement alcalin réalisé par un béton apparaît globalement favorable à la limitation du relâchement de radionucléides vers le milieu géologique,
- ✓ La conception du colis de stockage doit permettre de préserver les qualités techniques du béton (T< 70°C).

<u>Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte</u>

- ✓ Limiter les sollicitations thermiques :
  - Pour les colis de stockage MAVL exothermiques, la puissance thermique des colis primaires doit être limitée pour que la température de la roche hôte ne dépasse pas, que ce soit en phase d'exploitation ou en phase après fermeture, la limite admissible garantissant l'absence de phénomènes irréversibles. Le nombre de colis de stockage et donc la densité de puissance thermique dans les alvéoles et au niveau de la zone de stockage doivent être limités pour que la température de la roche hôte ne dépasse pas la limite admissible de 90°C à ce stade garantissant l'absence de phénomènes irréversibles.
- ✓ Préserver les propriétés mécaniques :
  - La composition, la conception, la fabrication et le comportement à long terme du colis de stockage doivent minimiser la présence de vides résiduels dans l'alvéole de stockage (vides entre le colis de stockage et l'alvéole et vides entre le colis de stockage et le colis primaire) et contribuer ainsi à limiter dans le temps les déformations de la formation hôte.
- ✓ Préserver les propriétés chimiques de sorption et précipitation :
  - La perturbation des propriétés chimiques de sorption et de précipitation de la formation hôte par l'environnement chimique résultant de la composition des colis de stockage doit être limitée à la zone endommagée géo-mécaniquement.
  - Les caractéristiques des colis doivent être prises en compte : les quantités en matières organiques et complexants doivent être minimisées et la non possibilité de les séparer en modules dédiés, le cas échéant, sera justifiée.
- ✓ Préserver les propriétés hydrauliques et de transport :
  - Le colis de stockage ne participe pas directement à cette fonction. Sa tenue mécanique contribue néanmoins à limiter les déformations de la roche.

- ✓ La conception en lien avec le mode de manutention doit limiter le taux de vide de l'alvéole après fermeture qui influence le comportement de la zone endommagée, et en conséquence les propriétés hydrauliques et de transport.

Description de l'option retenue

Tel que présenté au chapitre 3, un conteneur de stockage de conception générique en béton est privilégié, ce qui permet de contribuer à un environnement chimique favorable à la limitation du relâchement des radionucléides.

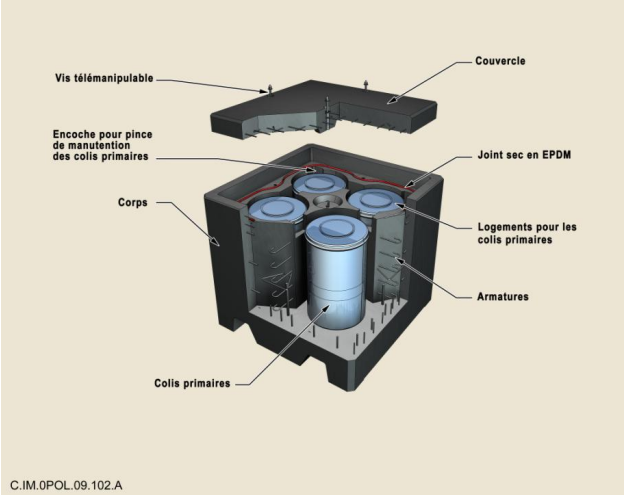


Figure 4.3-2 *Schéma illustrant un colis de stockage de déchets MAVL associé à une manutention « individuelle »*

La minimisation des vides est privilégiée car la présence de vide peut influencer le comportement à long terme de la zone endommagée (cf. section 4.4.3.2).

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

4.3.3 Le milieu géologique

Les formations encaissantes (supérieures et inférieures), ne se voient attribuer aucune fonction de sûreté. Les encaissants interviennent dans les évaluations au titre de voie de transfert des radionucléides vers la surface, ce sont en premier lieu leur représentation globale dans le scénario d'évolution normale, ainsi que les paramètres relatifs au transport (convectif et diffusif) qui sont importants, ainsi que leur évolution dans le temps (évolutions géodynamique et géomorphologique). Aucune propriété de rétention chimique ne leur est affectée, leur géochimie ne présente donc pas la même importance que celle du Callovo-Oxfordien, au regard de la sûreté. Leurs caractéristiques en tant qu'aquifères sont néanmoins importantes pour le choix d'exutoires du scénario d'évolution normale. C'est en fonction des possibles ressources en eau dans les encaissants que sera définie la position des prélèvements d'eau qui alimentent le ou les groupe(s) de référence hypothétique(s) utilisé(s) en vue des calculs d'impacts.

Fonctions/exigences de sûreté

Les exigences à garantir portent ainsi plus particulièrement sur la formation hôte, c'est elle qui contribue aux fonctions de sûreté. En effet, les caractéristiques à considérer pour l'accomplissement des fonctions de sûreté résulte des caractéristiques intrinsèques de la formation hôte favorables à leur réalisation.

Les fonctions de sûreté auxquelles la formation hôte participe sont les suivantes :

- Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines
  - ✓ La formation hôte doit se trouver à une profondeur assurant la protection du stockage contre les phénomènes de surface ; le guide de sûreté situe la profondeur minimale requise de ce point de vue à environ 200 m.
  - ✓ Le site de stockage ne doit pas contenir des ressources souterraines exceptionnelles extractibles susceptibles de susciter des travaux de prospection (cf. Chapitre 1).
- S'opposer à la circulation d'eau :
  - ✓ La formation hôte participe à cette fonction par ses caractéristiques intrinsèques de perméabilité. La faiblesse du gradient vertical créé par la différence de charge entre les encaissants y contribue également.
- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :
  - ✓ La formation hôte participe à cette fonction par les caractéristiques de ses eaux interstitielles qui influencent la rétention chimique au sein du stockage, en particulier dans les alvéoles.
- Retarder et atténuer la migration des radionucléides :
  - ✓ La formation hôte contribue à cette fonction par ses caractéristiques intrinsèques de diffusion, et de rétention chimique par sorption et précipitation.

Les exigences à considérer pour l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- La formation hôte doit être peu perméable à l'eau, homogène sur le plan horizontal et ne doit pas présenter de fractures hydrauliques.
- La formation hôte doit être d'une épaisseur permettant de limiter et retarder la migration des radionucléides, en tirant parti de la décroissance radioactive et de l'atténuation apportée par l'étalement des radionucléides (cf. Chapitre 1, Figure 1.5-3).
- L'extension horizontale de la formation hôte doit être suffisante pour implanter des zones de stockage suffisamment espacées afin de réduire les contraintes thermiques et mécaniques sur la formation hôte.
- La formation hôte doit résister aux sollicitations hydraulique, thermique, mécanique, chimique et radiologique générées par les activités de construction et d'exploitation du stockage. Selon le principe d'itération, la conception du stockage utilise la connaissance acquise pour prendre en compte et limiter les sollicitations à un niveau compatible avec la préservation des caractéristiques de la formation hôte mobilisées pour les fonctions de sûreté. La préservation, par la conception, des propriétés favorables de l'argilite autour des ouvrages, notamment des alvéoles et des modules, est abordée ci-après :
  - ✓ La formation hôte doit évacuer la puissance thermique dégagée par les déchets exothermiques en résistant aux sollicitations thermiques générées par le stockage des déchets considérée à une intensité imposée par les options de conception du stockage de déchets retenues (température dans l'argilite maintenue strictement inférieure à 90°C). La capacité de dissipation résulte notamment d'une caractéristique intrinsèque de la formation hôte, la conductivité thermique. Cela induit une exigence de dimensionnement : espacement des alvéoles HA entre elles et des colis HA dans les alvéoles de façon à respecter les critères thermiques et les espacements des zones afin de limiter leurs interactions thermiques.
  - ✓ La formation hôte doit résister aux déformations mécaniques aux limites imposées par les activités de construction et d'exploitation des ouvrages et par les exigences de conception et de sûreté.
  - ✓ La formation hôte doit résister aux perturbations chimiques aux limites imposées par les exigences de conception et de sûreté.

Description de la formation du Callovo-Oxfordien vis-à-vis des fonctions et exigences précédentes

Cette description/ justification du respect des exigences tient compte des acquis du programme de reconnaissance conduit sur la zone de transposition depuis 2005 et des acquis au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne qui ont conforté les caractéristiques favorables de la formation hôte et des formations encaissantes annoncées dans le Dossier 2005 (Andra, 2009g).

Les connaissances acquises en 2007 et 2008 confirment la validité de l'ensemble des paramètres « enveloppes » qui avaient été définis pour les évaluations de sûreté du Dossier 2005.

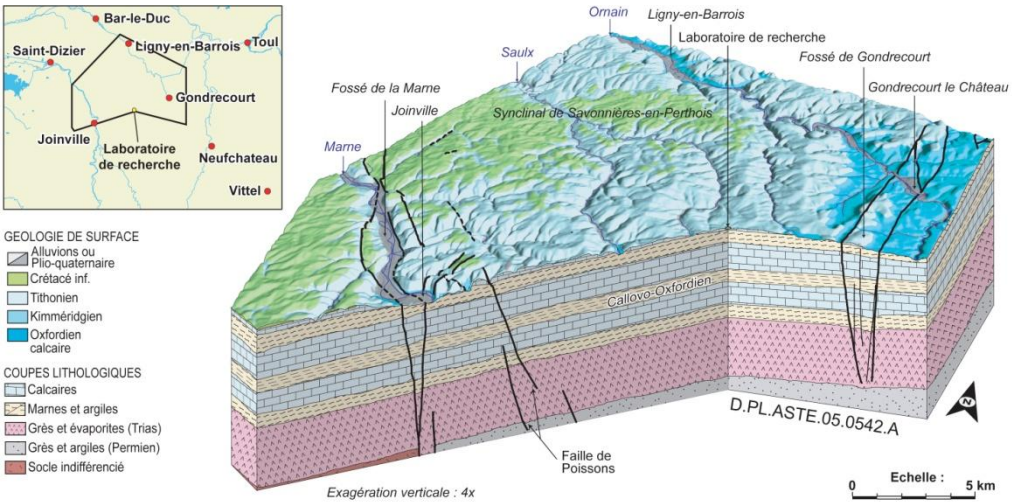


Figure 4.3-3 *Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute-Marne (Andra, 2009g)*

Le jalon 2009 correspond à la proposition au gouvernement, après concertation avec les élus locaux et le CLIS[43] d'une ZIRA (Zone d'Intérêt pour une Recherche Approfondie, Andra, 2009f) au sein de la zone de transposition à l'intérieur de laquelle serait implanté le stockage. Cette description fait état, le cas échéant, des éléments associés au choix de la ZIRA.

- Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines :
  - ✓ sur toute la zone de transposition, la formation hôte se trouve à une profondeur supérieure à 400 m ce qui permet de satisfaire à l'exigence de la profondeur nécessaire mentionnée dans le guide de sûreté (ASN, 2008) pour assurer la protection du stockage contre les phénomènes d'érosion en surface,
  - ✓ la formation hôte est exempte de ressources naturelles pouvant inciter une intrusion humaine sur toute la zone de transposition et en particulier sur la ZIRA ; les résultats du programme profond indiquent un potentiel géothermique réduit.
- S'opposer à la circulation d'eau :
  - ✓ de par ses caractéristiques bien connues grâce au laboratoire souterrain et au programme de reconnaissance sur la zone de transposition, les propriétés hydrauliques de la formation hôte (faible perméabilité, homogénéité, faible gradients verticaux) permettent de s'opposer à la circulation de l'eau. Les acquis de connaissance confirment ces caractéristiques (Andra, 2009g) :
    - L'absence de faille sur la zone de transposition. Les profils sismiques 2D n'ont mis en évidence aucune faille sur la zone étudiée, aucun des forages réalisés n'a traversé de faille secondaire (de quelques centaines de mètres d'extension), aucune faille n'a été traversée lors du creusement des galeries du laboratoire souterrain. Un forage dirigé oblique a traversé la zone où la sismique 3D avait détecté des structures subverticales de direction ouest nord ouest – est sud est. Les observations montrent qu'il ne s'agit pas de failles mais d'un faciès qui s'apparente à des récifs de coraux, les mesures réalisées révèlent que cette zone présente une très faible perméabilité.
    - La très faible perméabilité de la formation hôte. Les mesures en forage profond et sur échantillons ont révélé une perméabilité de la couche qui varie de $1.5.10^{-12}$ à 10^{-14} mètre par seconde (m/s), l'essentiel des mesures étant concentré entre 5.10^{-13} et 5.10^{-14} m/s. Il n'est pas observé de variation latérale marquée de la perméabilité, une légère tendance

[43] CLIS : Comité Local d'Information et de Suivi du Laboratoire souterrain de recherche sur la gestion des déchets radioactifs de Bure

évolutive dans les niveaux supérieurs de la couche ; les acquis permettent de disposer de profils de variation de la perméabilité verticale à l'échelle de la zone de transposition.
- Le faible gradient hydraulique dans la formation. Compte tenu de la position de la ZIRA, la valeur du gradient est de 0,2 m/m à l'actuel.

- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :
  - ✓ la formation hôte participe à cette fonction par les caractéristiques de ses eaux interstitielles qui influencent la rétention chimique au sein du stockage en particulier les alvéoles. Les expérimentations en laboratoire souterrain confirment le caractère réducteur et un pH proche de la neutralité :
    - Les caractéristiques géochimiques de la formation sont précisées, notamment grâce aux résultats de l'expérimentation PAC (Prélèvements pour Analyse Chimique) qui a permis de vérifier la validité du modèle de composition géochimique de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien. Un pH neutre et une eau réductrice comme le laissait penser la présence de pyrite et de matière organique ont été confirmés. Dans ces conditions, de nombreux radionucléides présentent une faible solubilité dans l'eau, c'est le cas par exemple des actinides (famille de l'uranium).
- Retarder et atténuer la migration des radionucléides :
  - ✓ la formation hôte contribue à cette fonction par ses caractéristiques intrinsèques. Les résultats des expérimentations en laboratoire souterrain et du programme de reconnaissance confortent ces caractéristiques (Andra 2009g) :
    - La formation hôte a une épaisseur de 140 m a minima dans la ZIRA retenue et les acquis du programme de reconnaissance consolident l'homogénéité latérale de la formation. L'épaisseur de couche varie de manière régulière du sud vers le nord est, la position de la ZIRA privilégie une épaisseur de garde minimale de 60 m de part et d'autre du stockage lorsque l'implantation est en zone médiane de la couche du Callovo-Oxfordien. Elle permet de répondre à l'exigence de sûreté d'une épaisseur minimale de 60 m. Les phénomènes de diagénèse enregistrés par le Callovo-Oxfordien sont très discrets et d'extension régionale. Le résultat des observations révèle qu'ils ne sont pas la cause d'hétérogénéités à l'échelle de la zone de transposition.
    - Les caractéristiques hydrauliques et de transport de la formation hôte sont confortées par les résultats de la campagne de forage sur la zone de transposition. Des profils de perméabilité, porosité, coefficients de diffusion sont consolidés par ces mesures.
    - La distribution des éléments mobiles obtenus sur échantillons montre que le transport des éléments chimiques se fait très lentement par diffusion. Elle est confortée par l'interprétation des expériences de diffusion réalisées sur échantillons ou in situ (expérience DIR, Diffusion et Rétention). Les valeurs sont cohérentes avec celles obtenues au stade du Dossier 2005, elles permettent de retenir comme valeurs de référence un coefficient de diffusion de $2{,}5.10^{-11}$ mètres carrés par seconde (m^2/s) pour l'eau tritiée et 5.10^{-12} m^2/s pour les espèces anioniques (iode et chlore notamment). Il est de plus rapporté une très faible variabilité de ces valeurs sur toute la hauteur de la formation hôte.
    - La capacité de rétention des radionucléides est confirmée par les essais de diffusion d'espèces cationiques (tel que le césium) tant in situ dans le laboratoire souterrain qu'en laboratoire de surface selon différentes configurations expérimentales (chimie de l'eau, teneur de l'élément en solution). Les principaux éléments étudiés sont l'iode, le technétium, le césium, le sélénium, le bore, le chrome, le nickel, le zirconium, le niobium, le molybdène, l'étain, le plomb, l'uranium, le neptunium, et le plutonium (Andra, 2009g).

4.3.4 Architecture des installations souterraines

Le document (Andra, 2009c) présente les concepts qui constitueront la base des études de conception après 2009 en vue de la constitution des dossiers à fournir pour la demande d'autorisation de création (DAC) en 2014. Les principales évolutions sont celles décrites en section 4.3.1.

Le centre de stockage est constitué d'installations en surface et en souterrain, reliées par des ouvrages de liaison. Ces ouvrages de liaison peuvent être des puits verticaux ou des descenderies.

Les paragraphes suivants présentent dans un premier temps l'architecture à terminaison qui intègre comme base de conception :

- un fractionnement par modules et si besoin des zones de déchets distinctes physiquement,
- l'implantation d'une descenderie double tube déroulée (élément nouveau par rapport au Dossier 2005),
- l'implantation centrée du groupe de puits principal (elle était décentrée dans le cadre du Dossier 2005),
- une évolution de la conception des alvéoles de déchets MAVL depuis 2005 : alvéoles passantes, longueur augmentée, diamètre diminué,
- l'implantation faiblement excentrée d'un puits de retour d'air dans la zone de déchets MAVL (élément nouveau),
- un maintien du chemisage en tête d'alvéole de déchets HA,
- la mise en place de scellements, notamment le scellement de puits de retour d'air et les scellements de descenderie.

4.3.4.1 Architecture

L'architecture des installations souterraines doit garantir l'atteinte des objectifs de sûreté relatifs à la protection du public et de l'environnement au travers de l'accomplissement des fonctions de sureté en phase après fermeture assurées par les options de sûreté retenues pour les installations.

Elle participe aux fonctions de sûreté suivantes :

- Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines :
  - ✓ L'architecture contribue à limiter les effets de potentielles intrusions humaines, notamment par un fractionnement modulaire qui limite l'inventaire mobilisable en cas d'intrusion involontaire.
- S'opposer à la circulation d'eau :
  - ✓ L'architecture contribue à limiter la circulation d'eau dans les ouvrages et leur zone endommagée associée en limitant les perturbations du régime hydraulique naturel de la formation hôte. Elle y participe en limitant la capacité de drainage totale du stockage, et en évitant des configurations d'ouvrages (puits, descenderies, galeries) créant des moteurs hydrauliques et en limitant l'endommagement des argilites (zone potentielle de circulation de l'eau).
- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :
  - ✓ L'architecture contribue à cette fonction par la conception d'alvéoles de stockage adaptées aux caractéristiques des colis de déchets (nature des matériaux favorisant l'immobilisation des radionucléides et/ou préservant la matrice des déchets).
- Retarder et atténuer la migration des radionucléides :
  - ✓ L'architecture des installations souterraines contribue à favoriser la diffusion comme mode dominant de migration des radionucléides dans la formation hôte, de façon à tirer parti de la décroissance radioactive.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement des fonctions attribuées à l'ensemble des options de sûreté du stockage sont les suivantes :

- l'architecture des installations souterraines doit sectoriser et isoler les conséquences d'intrusions humaines sur les déchets,
- l'architecture des installations souterraines doit limiter la présence et la formation de voies de circulation d'eau dans les ouvrages et dans leur zone endommagée associée,
- l'architecture des installations souterraines doit limiter la présence et la formation de voies et vecteurs de migration autre que la diffusion dans la formation hôte que ce soit en situation normale ou altérée,
- l'architecture des installations souterraines doit sectoriser les risques liés aux caractéristiques des déchets et :

- ✓ permettre la définition par zone de dispositions contribuant à la maîtrise de ces risques afin de limiter le relâchement des radionucléides et leur immobilisation dans le stockage,
- ✓ assurer une protection des colis de déchets, et des ouvrages vis-à-vis de ces risques par séparation géographique en zone, sous-zones le cas échéant, et modules,

- l'architecture des installations souterraines doit permettre de limiter les perturbations pour préserver les propriétés de la formation hôte favorables au retard et à l'atténuation de la migration des radionucléides, notamment :
  - ✓ des sollicitations thermiques induites par la puissance thermique dégagée par les colis de déchets exothermiques, des sollicitations mécaniques (taux de vide), et des interactions chimiques induites notamment par les produits issus de la dégradation des colis (complexants, colloïdes),
  - ✓ des sollicitations mécaniques induites par la fabrication et l'exploitation des installations souterraines.

Description des architectures à terminaison

L'inventaire des colis de déchets pris en compte pour l'établissement de l'architecture du stockage présentée ici correspond au *scénario de base* défini dans le Modèle d'Inventaire 2009 (Andra, 2009d).

Les caractéristiques des déchets considérés pour le stockage sont fonction des scénarios de retraitement et des conditionnements envisagés. Les données détaillées sont fournies dans le référentiel de connaissance et le modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue (Andra, 2009d).

Les colis de déchets HA et MAVL sont respectivement regroupés en famille de colis types selon leurs principales caractéristiques radiologiques, et géométriques, et selon leur contenu physico-chimique (cf. chapitre 1). Les colis sont répartis en trois grandes classes : les colis de déchets HA vitrifiés qui distinguent les C0 des autres déchets vitrifiés, les colis de déchets HA de type combustibles usés CU3 et les colis de déchets MAVL :

- les déchets HA vitrifiés sont pour l'essentiel des produits de fission et des actinides mineurs issus du retraitement des combustibles et incorporés dans une matrice de verre après calcination. La haute activité « beta-gamma » génère un dégagement thermique important. Ils comprennent les colis C0, faiblement exothermiques et les colis type C1, C5, C6, C7, C8 et C9 exothermiques qui nécessitent un entreposage avant stockage,
- les combustibles non traités inclus dans le modèle d'inventaire comprennent des combustibles résiduels issus des réacteurs « UNGG », des combustibles issus d'activité de recherche, des combustibles de propulsion nucléaire,
- les déchets MAVL comprennent une diversité de déchets qui inclut des déchets directement issus des combustibles usés traités dans les usines de la Hague. Il s'agit d'éléments de structure des assemblages de combustibles. Ces déchets qualifiés de « CSD-C » sont compactés et conditionnés dans des conteneurs dont la géométrie externe est pratiquement identique à celle des déchets HA vitrifiés. Leur puissance thermique est d'une trentaine de watts. D'autres types de déchets MAVL sont liés à l'usage et au démantèlement des installations. Ils contiennent également des résidus d'effluents liquides bituminés dans la station de traitement des effluents de Marcoule.

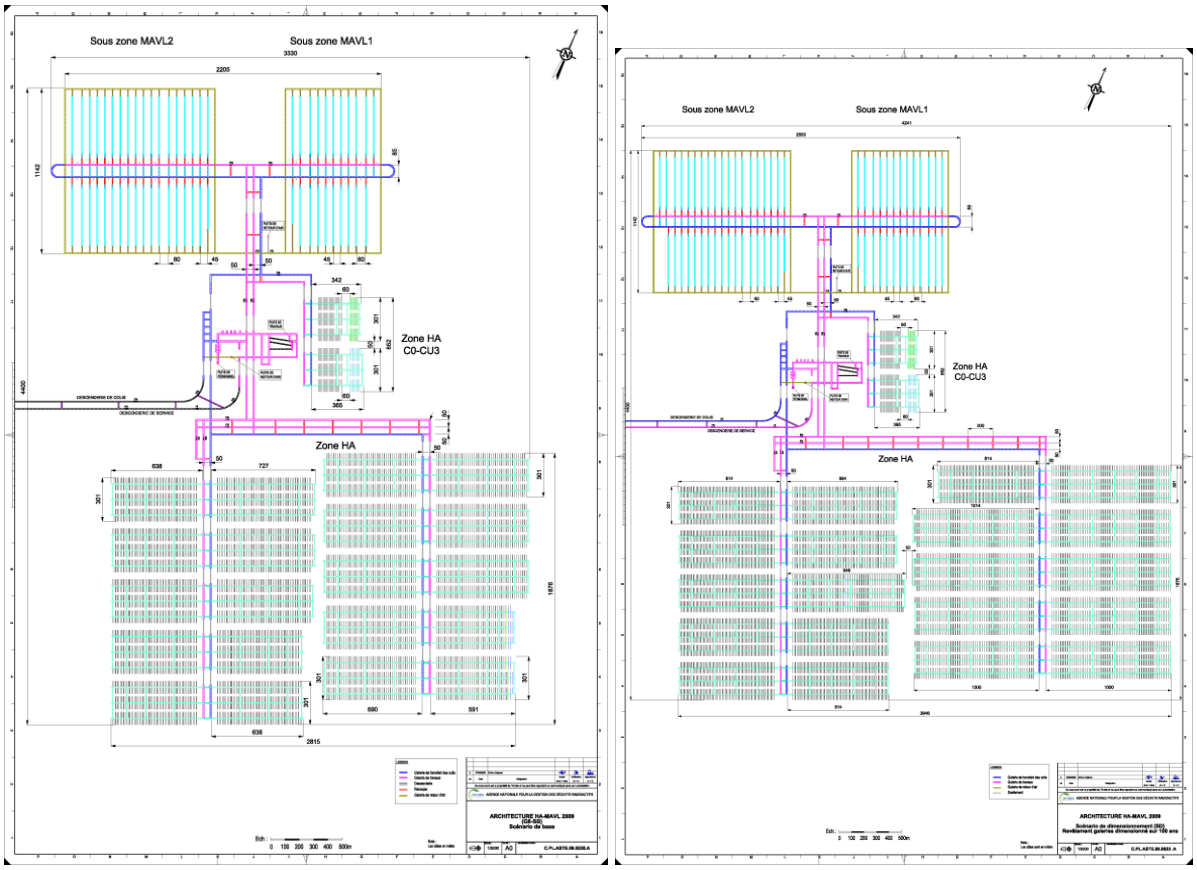


Figure 4.3-4 *Schémas illustrant des architectures à terminaison pour le scénario de base (à gauche) et pour le scénario de dimensionnement (à droite).*

L'inventaire des déchets à stocker du *scénario de base* comporte à titre indicatif tel que défini aujourd'hui (cf. Chapitre 1.6.7) :

- 218 920 colis primaires de déchets MAVL non ou peu exothermiques,
- 4 435 colis de stockage de déchets C0 moyennement exothermiques, qui peuvent être stockés sans entreposage préalable,
- 40 860 colis de stockage de déchets HA exothermiques (colis type C1, C5, C6, C7, C8 et C9) qui nécessitent un entreposage préalable de plusieurs dizaines d'années, dont la durée impacte le dimensionnement des zones de stockage.

A cet inventaire, viennent s'ajouter les combustibles usés provenant des réacteurs autres qu'électronucléaires (recherche, défense), regroupés sous l'appellation CU3. Les étuis, au nombre de 5 460, sont moyennement exothermiques et peuvent, de la même manière que les déchets C0, être stockés sans entreposage préalable.

La sûreté à long terme s'appuie sur l'inventaire radiologique des déchets, incluant la nature des éléments (radioactifs et toxiques chimiques), les activités (Bq/colis, g/colis ou mol/colis) mais également leurs caractéristiques thermiques et leur mode de conditionnement influençant les modèles de relâchement.

La sensibilité de l'architecture à une variation d'inventaire a été examinée avec le scénario de dimensionnement défini dans le modèle d'inventaire 2009 (Andra, 2009d). Par rapport au scénario de base, l'inventaire des déchets du scénario de dimensionnement est augmenté.

Cette option se traduit par des variations du nombre et/ou de la taille des modules, et montre la flexibilité de l'architecture à cette variation de l'inventaire.

Ces architectures sont de type générique c'est-à-dire qu'elles ne prennent pas en compte les éventuelles contraintes de disposition relatives des zones et des accès que pourraient induire la

géométrie réelle et le positionnement des ZIIS et ZIRA finalement retenues. Elle est prévue sur un seul niveau correspondant au niveau d'argilosité maximale au sein du Callovo-Oxfordien.

L'orientation des ouvrages est aujourd'hui dictée par l'orientation du tenseur des contraintes géostatiques et non par celle du pendage. Le pendage de la couche étant en moyenne de 1,5 %, et au maximum de 2,5%, la direction de ce pendage n'est pas déterminante pour la conception de l'architecture générale. Toutefois, afin de préserver la garde d'argilites au-dessus et au-dessous des alvéoles de stockage, la conception de l'architecture générale, notamment la définition de la longueur des alvéoles de stockage, intégrera le pendage de la couche correspondant à la localisation du stockage sur le site de Meuse/Haute-Marne.

4.3.4.2 Séparation en zones et séparation en modules

La diversité des déchets et en particulier leurs contenus chimiques (présence de complexants tels que EDTA, phtalate, TBP, présence d'espèces chimiques potentiellement agressives comme l'aluminium, le magnésium, le borate et l'ammonium, et présence d'organiques), leur thermicité et leur production de gaz conduit à rechercher une indépendance phénoménologique des zones de stockages et de certains modules. En les séparant dans le stockage, c'est-à-dire en instaurant des épaisseurs de Callovo-Oxfordien (distances de garde) entre eux, les interactions peuvent être moins complexes, et leur influence sur le transport et la rétention des radionucléides limitée à des niveaux imposés par les options de conception :

- la séparation en zones permet de se prémunir notamment contre d'éventuels effets thermiques : la distance de 250 m envisagée entre les zones MAVL et HA permet une indépendance phénoménologique en évitant une interaction thermique (cf. section 0),
- le stockage de déchets MAVL en modules dédiés à un seul type de déchets (avec ou sans production de gaz, avec ou sans matières organiques et dans ce dernier cas avec ou sans complexants mobilisateurs) espacés d'une distance de 60 m[44] permet d'éviter les interactions chimiques (cf. section 0) et de limiter l'influence de substances complexantes sur le transport des radionucléides.

L'architecture présentée *Figure 4.3-5* comprend ainsi 3 zones de stockage physiquement distinctes :

- la zone de stockage de déchets MAVL,
- la zone de stockage de déchets HA,
- la zone de stockage de déchets C0/CU3.

[44] Correspondant à l'épaisseur de garde verticale de roche hôte au dessus comme en dessous des alvéoles de stockage.

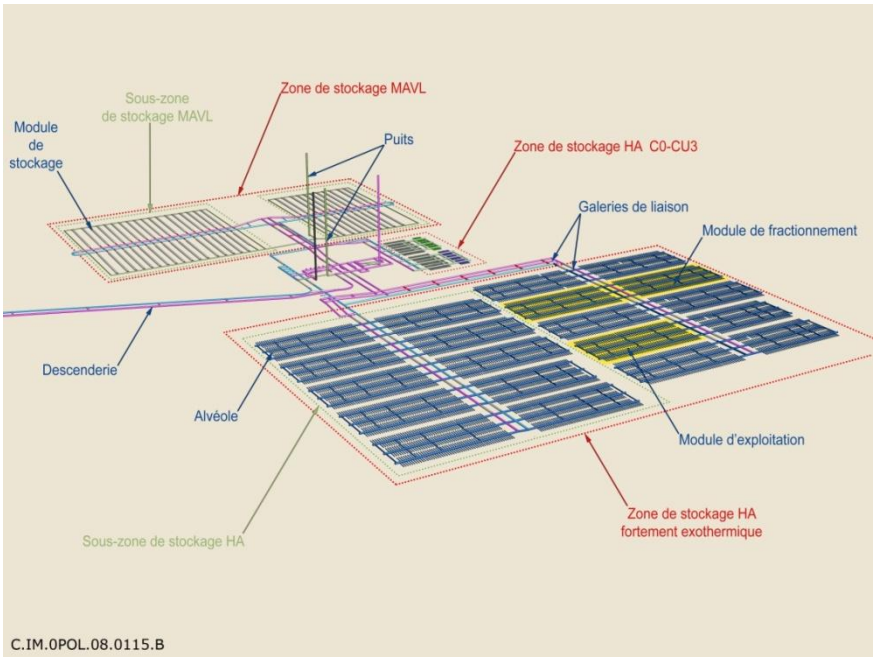


Figure 4.3-5 Représentation schématique des installations souterraines à terminaison

La zone de déchets C0/CU3

Les déchets HA de type C0/CU3 sont stockés dans une zone séparée. Les combustibles usés CU3, compte tenu de leur volume cumulé réduit et de leurs similitudes dimensionnelles et thermiques avec certains colis C0, sont stockés dans la même zone de stockage que les déchets C0. Une alvéole de stockage ne contient en revanche qu'un seul type de colis (C0 ou CU3) et les alvéoles de déchets C0 regroupées par « paquet(s) » sont séparées du (des) « paquet(s) » d'alvéoles de combustibles usés CU3 d'une distance minimale de 60 m.

Cette zone HA et C0/CU3 regroupe de façon arborescente deux sous-zones, des modules, et des alvéoles. Chaque module regroupe quelques centaines d'alvéoles.

La zone de déchets HA

Les zones de stockage HA fortement exothermiques sont subdivisées de façon arborescente en sous-zones, modules, et alvéoles. Les modules constituent les éléments de base du fractionnement du stockage justifié par la sûreté à long terme.

Chaque sous-zone HA est divisée en au moins une dizaine de modules de fractionnement pour limiter les conséquences d'un éventuel forage d'intrusion (Figure 4.3-6). Chaque module est destiné à recevoir un scellement qui sera réalisé dans les galeries secondaires.

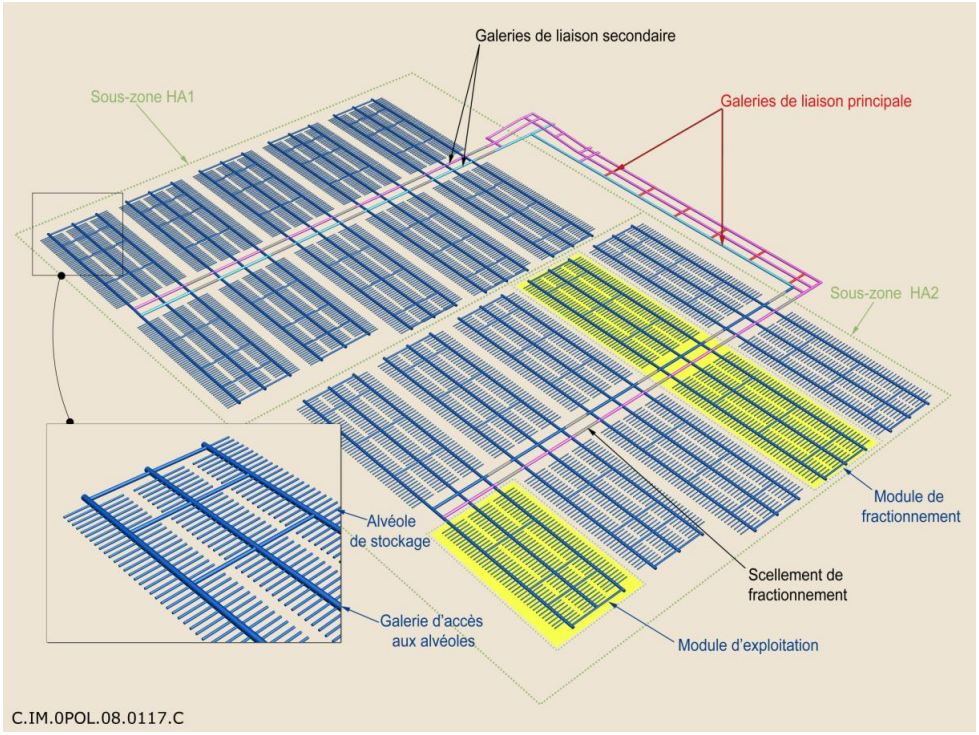


Figure 4.3-6 Représentation schématique de la zone HA

Zone de déchets MAVL

Dans la zone de déchets MAVL, chaque module est constitué d'une alvéole, de sa galerie d'accès et de sa galerie d'extraction d'air. Elle correspond à la fois à un module de fractionnement et à un module d'exploitation (Figure 4.3-7.).

Au jalon 2009, l'architecture présente deux sous-zones MAVL disposées en « T ». L'une contient des modules de type 1 accueillant des colis de déchets sans matière organique, l'autre des modules de type 2 (Figure 4.3-7) recevant les déchets contenant de la matière organique. Au sein de chaque sous-zone les modules sont séparés par une distance de 60 mètres (cf. section suivante).

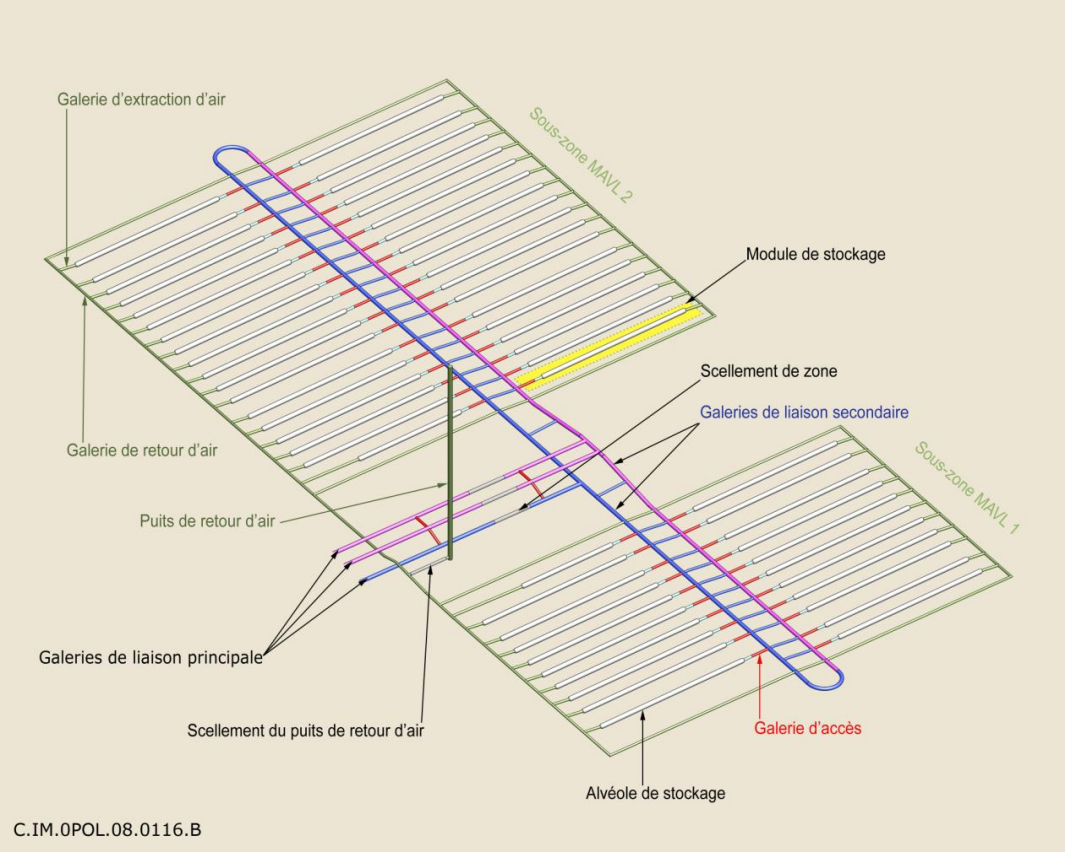


Figure 4.3-7 Représentation schématique de la zone MAVL

4.3.4.3 Module de déchets MAVL

L'alvéole de stockage de déchets MAVL correspond à un module. L'alvéole participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté en phase après fermeture suivantes :

- S'opposer à la circulation d'eau :
  - ✓ Les scellements de l'alvéole de stockage de déchets MAVL s'opposent à la circulation d'eau vers les galeries d'accès et de retour d'air par leur caractéristique hydraulique de perméabilité.
- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :
  - ✓ L'alvéole de stockage de déchets MAVL contribue à générer un environnement chimique favorable à l'immobilisation dans l'alvéole des substances radioactives.
- Retarder et atténuer la migration des radionucléides :
  - ✓ Les scellements des alvéoles de stockage de déchets MAVL contribuent à cette fonction par leurs caractéristiques intrinsèques de diffusion, et de rétention chimique par sorption et précipitation.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions et de celles attribuées à l'ensemble des options de sûreté du stockage sont les suivantes :

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les colis de stockage :
  - ✓ L'alvéole de stockage de déchets MAVL doit protéger contre les risques d'origine interne et externe les colis de stockage de sorte qu'ils puissent accomplir les fonctions de sûreté qui leur sont allouées en phase après fermeture.
  - ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation de l'alvéole pouvant affecter les fonctions de sûreté assurées par les colis de stockage.
  - ✓ La conception, la fabrication, l'exploitation et l'évolution dans le temps de l'alvéole de stockage doivent garantir les performances et caractéristiques de l'alvéole de stockage requises vis-à-vis des fonctions de sûreté que doivent assurer les colis de stockage.

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par l'alvéole de stockage :
  - ✓ Pour la limitation des flux d'eau, l'alvéole MAVL doit être scellée à chaque extrémité et ses scellements doivent être peu perméables à l'eau ; plus généralement les alvéoles doivent présenter une configuration limitant les flux hydriques.
  - ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation de l'alvéole et des ses scellements pouvant affecter les fonctions de sûreté qu'ils doivent assurer.
  - ✓ Les matériaux de soutènements, revêtement et remplissage de l'alvéole de stockage de déchets MAVL doivent prendre en compte la nature des déchets de stockage avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution du déchet dans le temps…) pour générer un environnement chimique contribuant à immobiliser les substances radioactives.
  - ✓ La conception, la fabrication, l'exploitation et l'évolution dans le temps de l'alvéole de stockage et de ses scellements doivent garantir les performances et les caractéristiques de l'alvéole de stockage requises vis-à-vis des fonctions de sûreté qu'elle doit assurer en phase après-fermeture.
- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte :
  - ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation de l'alvéole pouvant affecter les fonctions de sûreté assurées par la formation hôte.
  - ✓ La conception, la fabrication, l'exploitation et l'évolution dans le temps de l'alvéole de stockage doivent garantir les performances et caractéristiques de l'alvéole de stockage requises vis-à-vis des fonctions de sûreté que doit assurer la formation hôte.
  - ✓ La présence et la formation de vides résiduels dans l'alvéole de stockage (vides entre le colis de stockage et l'alvéole et vides entre le colis de stockage et le colis primaire) susceptibles de générer des déformations dans les argilites de la formation hôte doivent être limitées.
  - ✓ La perturbation des propriétés chimiques de sorption et de précipitation de la formation hôte par l'environnement chimique résultant de la composition de l'alvéole de stockage de déchets MAVL doit être limitée à la zone endommagée géo-mécaniquement.

Options de sûreté/conception

Comme indiqué au chapitre 3 (cf. sections 3.3.9 et 3.4.2.5), l'évolution de la conception des alvéoles MAVL a conduit à proposer des alvéoles passantes qui favorisent l'atteinte des exigences de sûreté en exploitation notamment faciliter l'accès à la maintenance des gaines et composants des systèmes de ventilation ; cette disposition présente l'intérêt d'un circuit aéraulique plus simple et plus robuste (par rapport à la solution d'une gaine de retour d'air noyée dans le béton de l'alvéole qui était envisagée dans le Dossier 2005).

Après fermeture, l'alvéole de déchets MAVL contribue à l'ensemble des fonctions : 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 vers l'environnement. Elle doit également préserver les propriétés favorables de la roche hôte.

Les alvéoles de stockage contribuent à ces fonctions par leurs caractéristiques d'emprise : section, longueur et orientation. En termes de caractéristiques dimensionnelles, la solution de référence est une alvéole :

- de diamètre excavé de 8 +/- 1 mètre maximum dans sa partie utile (cellule de stockage) de longueur jusqu'à 400 m (Figure 4.3-10),
- horizontale ou de pente très faible,
- orientée, si nécessaire, selon la direction de contrainte maximale (sigmaH) avec l'objectif de limiter l'endommagement de l'argilite (en particulier de l'extension de la zone endommagée) induit autour des ouvrages et de préserver les épaisseurs de gardes de l'argilite intactes autour des alvéoles.

La longueur de 400 m apparaît compatible avec la conservation des gardes d'argilites précitées (60 m) (Figure 4.3-8) et l'orientation de la contrainte horizontale majeure.

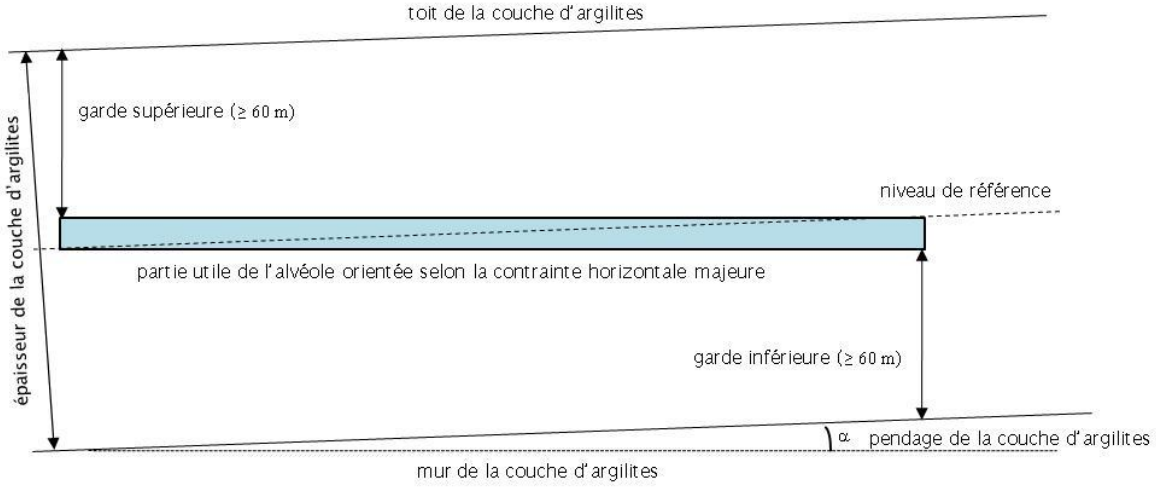


Figure 4.3-8 Position de l'alvéole MAVL dans la couche d'argilite (Andra, 2009c)

La réalisation de l'alvéole s'accompagne de la pose de boulon et de soutènements pour assurer la tenue mécanique. La chambre de stockage, de section rectangulaire, est adaptée à la géométrie parallélépipédique des colis (Figure 4.3-9) pour limiter les vides et maîtriser l'évolution de la structure de l'alvéole dans le temps et, en conséquence, la perturbation des argilites.

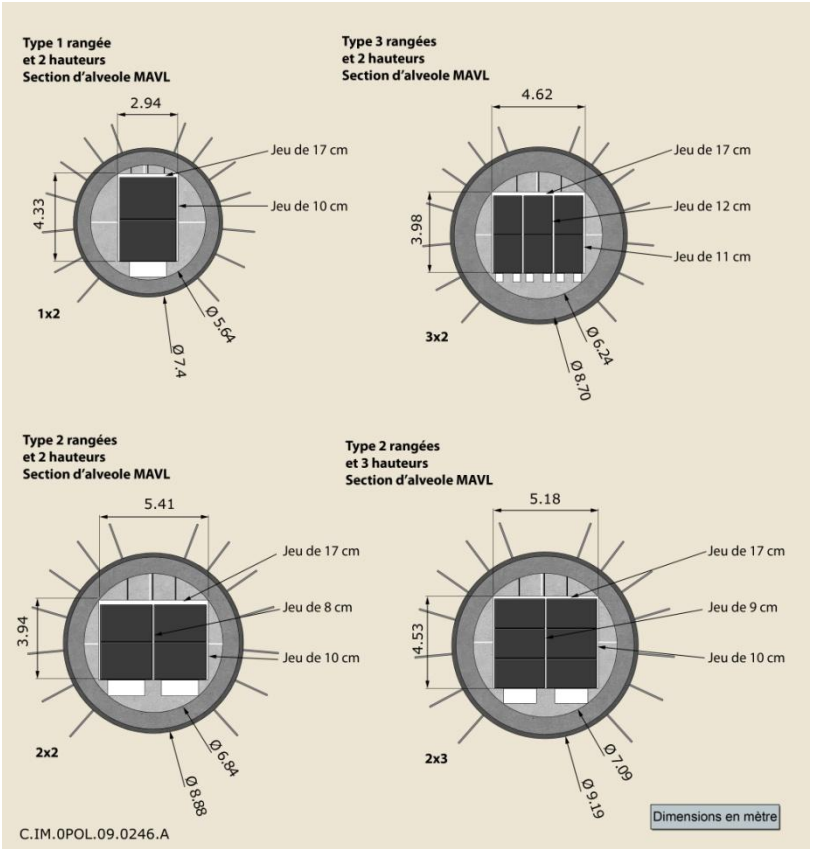


Figure 4.3-9 Exemples d'arrangement de colis de stockage dans une alvéole MAVL de section de 8 – 9 m

Dans l'alvéole, les taux de vides renvoient à la question de la maîtrise du comportement des différents composants de l'alvéole, en particulier l'EDZ autour des alvéoles. Des études sont en cours pour consolider la phénoménologie associée à la reprise des vides de l'alvéole de déchets MAVL. Néanmoins, il reste des incertitudes sur l'extension et l'intensité de ce sur-endommagement en l'état des connaissances actuelles (voir section *4.4.3.2*).

Des considérations relatives à la phase de construction et d'exploitation ont conduit à une architecture des zones MAVL dont les alvéoles sont « passantes » (Cf. Figure 4.3-10), connectées à une nouvelle galerie périphérique (une pour chaque sous-zone MAVL). Ces galeries collectent l'air de l'ensemble des galeries d'extraction d'air disposées en fond des alvéoles pour l'acheminer vers un puits de retour d'air MAVL décentré. Lors de la fermeture, chaque galerie d'extraction est dotée d'un scellement à base d'argile gonflante avec saignées construit sur le même principe que le scellement de l'accès de l'alvéole. Le diamètre excavé de la galerie d'extraction d'air est inférieur à celui de l'accès : 4,4 m environ au lieu de 7,0 m environ). Le diamètre excavé des galeries de retour d'air est proche de 5,5 m (Figure 4.3-10).

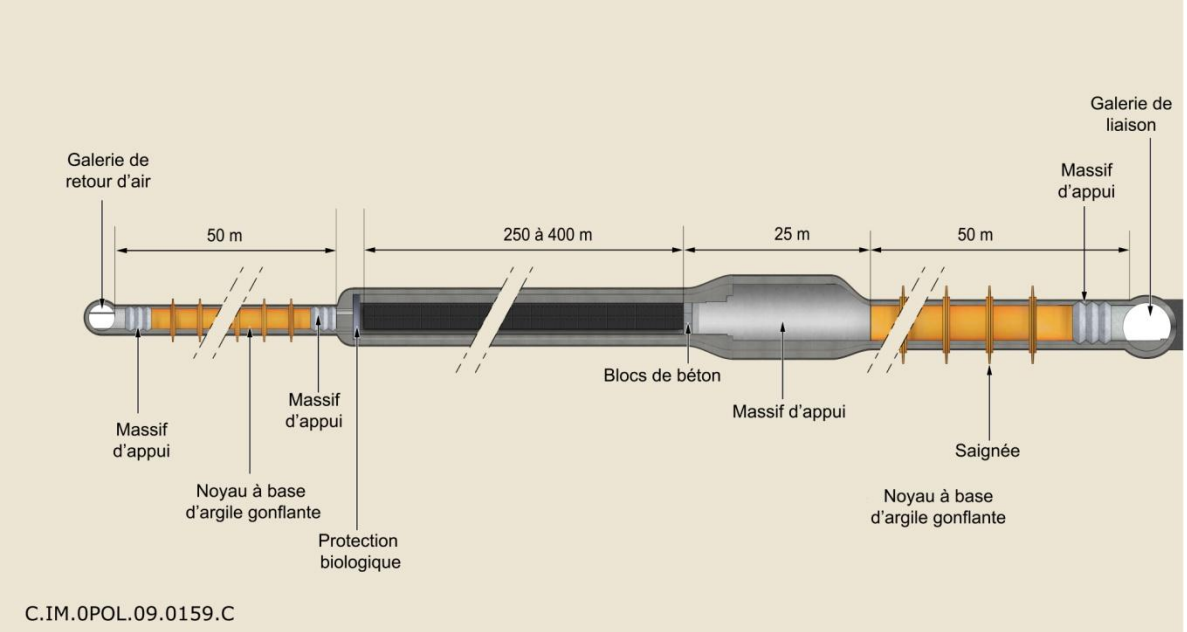


Figure 4.3-10 *Représentation schématique d'une alvéole de déchets MAVL selon une coupe longitudinale.*

4.3.4.4 Alvéoles de stockage des déchets HA

L'alvéole de stockage de déchets HA participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- S'opposer à la circulation d'eau :
  - ✓ Le bouchon d'alvéole de stockage de déchets HA et sa conception borgne s'opposent à la circulation d'eau vers les galeries d'accès.
- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :
  - ✓ L'alvéole de stockage de déchets HA contribue à générer un environnement chimique favorable à l'immobilisation dans l'alvéole des substances radioactives.
- Retarder et atténuer la migration des radionucléides :
  - ✓ Le bouchon des alvéoles de stockage de déchets HA contribue à cette fonction par leurs caractéristiques intrinsèques de diffusion et de rétention chimique par sorption et précipitation.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de cette fonction et de celles attribuées à l'ensemble des options de sûreté du stockage sont les suivantes :

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les colis de stockage :
  - ✓ L'alvéole de stockage de déchets HA doit protéger contre les risques d'origines interne et externe les colis de stockage pour qu'ils puissent accomplir les fonctions de sûreté qui leur sont allouées en phase après fermeture.

- ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation de l'alvéole pouvant affecter les fonctions de sûreté assurées par les colis de stockage.
- ✓ La conception, la fabrication, l'exploitation et l'évolution dans le temps de l'alvéole de stockage doivent garantir les performances et caractéristiques de l'alvéole de stockage requises vis-à-vis des fonctions de sûreté que doivent assurer les colis de stockage : par exemple, le matériau retenu ne doit pas générer de pH dégradant la matrice de verre.

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par l'alvéole de stockage :
  - ✓ L'alvéole de stockage de déchets HA doit être peu perméable à l'eau et présenter une configuration limitant les flux hydriques dans sa partie de stockage.
  - ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation de l'alvéole pouvant affecter les fonctions de sûreté qu'elle doit assurer.
  - ✓ Le choix des matériaux de construction de l'alvéole de stockage de déchets HA doit prendre en compte la nature des déchets de stockage avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution du déchet dans le temps…) pour générer un environnement chimique contribuant à immobiliser les substances radioactives.
  - ✓ La conception, la fabrication, l'exploitation et l'évolution dans le temps de l'alvéole de stockage doivent garantir les performances et caractéristiques de l'alvéole de stockage requises vis-à-vis des fonctions de sûreté qu'elle doit assurer en phase après-fermeture.
- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte :
  - ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation de l'alvéole pouvant affecter les fonctions de sûreté assurées par la formation hôte.
  - ✓ L'implantation, la conception, la fabrication, l'exploitation et l'évolution dans le temps de l'alvéole de stockage doivent garantir les performances et caractéristiques de l'alvéole de stockage requises vis-à-vis des fonctions de sûreté que doit assurer la formation hôte.
  - ✓ La présence et la formation de vides résiduels dans l'alvéole de stockage (vides entre le colis de stockage et l'alvéole et vides entre le colis de stockage et le colis primaire) susceptibles de générer des déformations dans la formation des argilites de la formation hôte doit être limité.
  - ✓ La perturbation des propriétés de sorption et de précipitation de la formation hôte par l'environnement chimique résultant de la composition des matériaux constitutifs de l'alvéole de stockage de déchets HA doit être limitée.

L'alvéole contribue à limiter le relâchement des radionucléides et à les immobiliser dans le stockage, retarder et atténuer la migration des radionucléides vers l'environnement et à préserver les propriétés favorables du milieu.

En imposant des conditions favorables en matière de chimie de l'eau, il s'agit de privilégier une précipitation des radionucléides pour les « immobiliser ». La fonction est essentiellement assurée par le caractère réducteur de l'eau interstitielle de l'argilite et les matériaux utilisés dans l'alvéole (matériaux métalliques et non du béton). Cette disposition concerne les radionucléides qui ont été relâchés par le verre.

La sensibilité de la dissolution du verre au pH conduit à imposer un contrôle de ce paramètre et ainsi éviter la mise en œuvre de matériaux hyperalcalins comme le béton qui génère des pH élevés. Le bouchon argileux contribue à cette fonction en étant interposé entre l'alvéole et les éléments en béton environnants, incluant le bouchon en béton.

Pour bénéficier d'un contrôle de la dissolution du verre (notamment par la silice), l'endommagement de l'alvéole est limité et l'alvéole refermée soigneusement, de manière à y limiter les débits d'eau. L'alvéole contribue à cette fonction en limitant le déconfinement de l'argilite, notamment par une implantation favorable vis-à-vis des contraintes naturelles et en minimisant les vides résiduels à l'intérieur de l'alvéole.

L'alvéole de stockage de déchets HA est un tunnel d'environ 40 mètres de longueur et de 0,7 m de diamètre. Elle comprend une partie utile sur environ 30 m de longueur, dans laquelle sont stockés les colis, qui est précédée par une tête d'alvéole d'environ 10 mètres. L'alvéole (« cellule de stockage »), qui accueille les colis, est dotée d'un chemisage en acier faiblement allié. Le fond d'alvéole est obturé par une « plaque de fond », de même composition chimique que le chemisage et vissée à celui-ci.

La tête d'alvéole est dotée d'un chemisage métallique (« insert ») dans lequel sont placés au moment de la fermeture un ensemble composé d'un bouchon d'argile gonflante appuyé sur un bouchon en béton. Le diamètre du chemisage de la partie utile est inférieur à celui de l'insert de la tête d'alvéole de manière à disposer d'un degré de liberté et à éviter les effets de poussée liés à l'allongement provoqué par les colis exothermiques.

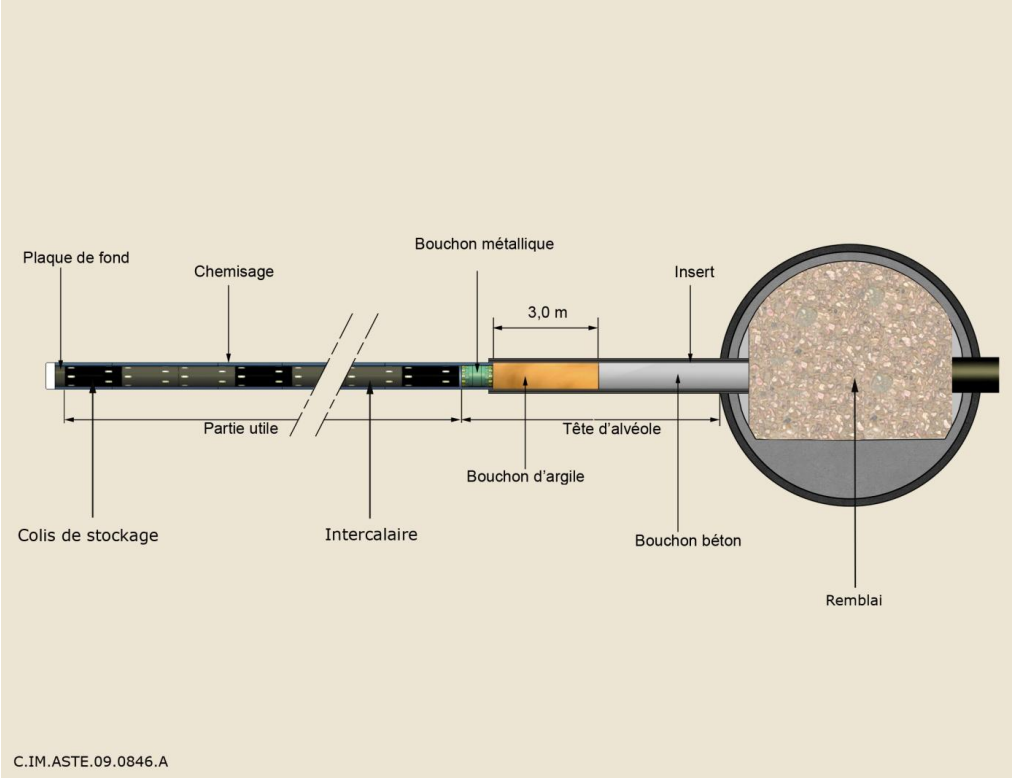


Figure 4.3-11 Schéma illustrant une coupe longitudinale d'alvéole de déchets HA, incluant les bouchons métalliques, d'argile et de béton.

Le maintien du chemisage permet de s'affranchir d'un sur-endommagement qui pourrait résulter d'un éventuel retrait du chemisage. Les fonctions hydrauliques du bouchon ne sont pas remises en cause du fait que l'alvéole est borgne et de conditions hydrauliques (diffusives dominantes) imposées par les scellements de galeries (cf. conclusions du Dossier 2005). L'évolution chimique du système est à étudier pour s'assurer que le cumul de perturbation n'induit pas d'effets néfastes, notamment en regard du transfert de colloïdes, ou produits de corrosion (section 4.4.5).

4.3.5 Ouvrages de liaison et leurs scellements

Les ouvrages de liaison participent à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- S'opposer à la circulation d'eau :
  - ✓ Les scellements des ouvrages de liaison (puits, descenderie ou galeries) s'opposent à la circulation d'eau vers l'environnement de surface par leur caractéristique hydraulique de perméabilité.
- Retarder et atténuer la migration des radionucléides :
  - ✓ Les scellements des ouvrages de liaison (puits, descenderie ou galeries) contribuent à cette fonction par leurs caractéristiques intrinsèques de diffusion, et de rétention chimique par sorption et précipitation.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions et de celles attribuées à l'ensemble des options de sûreté du stockage sont les suivantes :

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les colis de stockage :

- ✓ Les ouvrages de liaison (puits, descenderies, galerie) doivent protéger contre les risques d'origine interne et externe les colis de stockage de sorte qu'ils puissent accomplir les fonctions de sûreté qui leur sont allouées en phase après fermeture.

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les alvéoles de stockage :
  - ✓ Les scellements des ouvrages de liaison doivent être peu perméables à l'eau et présenter une configuration limitant les flux hydriques.
  - ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation des ouvrages de liaison surface-fond, ni de leurs scellements, pouvant affecter les fonctions de sûreté que doivent assurer les alvéoles (scellement de fractionnement qui protège contre l'intrusion humaine par forage).
  - ✓ Les matériaux de soutènements, revêtement des ouvrages de liaison doivent garantir les performances et caractéristiques requises vis-à-vis des fonctions de sûreté qu'ils doivent assurer en phase après fermeture.
- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte :
  - ✓ Les risques d'origine interne ou externe ne doivent pas entraîner une dégradation des ouvrages de liaison pouvant affecter les fonctions de sûreté assurées par la formation hôte.
  - ✓ La conception, la fabrication, l'exploitation et l'évolution dans le temps des ouvrages de liaison (incluant leur remblaiement et leur scellement) doivent garantir les performances et caractéristiques des ouvrages de liaison requises vis-à-vis des fonctions de sûreté que doit assurer la formation hôte, à savoir :
    - la protection de la formation hôte des sollicitations mécaniques par la pose de soutènements puis de remblais pour limiter la présence et la formation de voies de circulation dans les ouvrages et dans leur zone endommagée associée,
    - la limitation de la perturbation des propriétés de sorption et de précipitation de la formation hôte par l'environnement chimique résultant de la composition des matériaux constitutifs des ouvrages de liaison.

Description des options retenues

En cohérence avec l'architecture à terminaison, la maîtrise des circulations d'eau est également assurée par un ensemble de dispositions :

- implantation des ouvrages de liaison surface/fond (puits, descenderie) et des ouvrages de liaison souterrains (galerie), les puits sont groupés ou faiblement dégroupés,
- pose de scellements multiples dans ces ouvrages (puits, descenderies et galeries), ce qui contribue à s'opposer aux circulations d'eau et contrôler la migration des radionucléides (Figure 4.3-12). Ce dispositif de scellements en série permet d'assurer une complémentarité/redondance,
- choix et maîtrise des techniques de creusement et de soutènement (limitation de l'EDZ),
- orientation des ouvrages, en fonction des observations qui seront réalisées au laboratoire souterrain (dans la durée), si nécessaire, dans le sens de la contrainte majeure (en particulier ceux dans lesquels sont mis en place des scellements),
- traitement de la zone fracturée (interruption par des coupures hydrauliques par exemple),
- dimensionnement de scellements peu perméables prenant en compte les perturbations chimiques,
- nature et pose du remblai : modes de tassement et minimisation des vides.

L'analyse prend en compte les scellements des ouvrages de liaison surface/fond (scellements de puits principaux, scellements de puits de retour d'air et scellements de descenderie), les scellements de zones, les scellements de fractionnement (modules) et les bouchons d'alvéoles dans la définition des scénarios. Ces ouvrages sont présentés ci-après.

Les analyses quantitatives de sûreté et leurs résultats sont présentés dans les sections 4.5 et 4.6, notamment vis-à-vis d'un scénario défaut de scellement. Même dans la situation d'un gradient horizontal, du fait de l'espacement des ouvrages de liaison, le Callovo-Oxfordien reste la voie principale de transfert des radionucléides pour l'ensemble des configurations présentées en section 4.6.

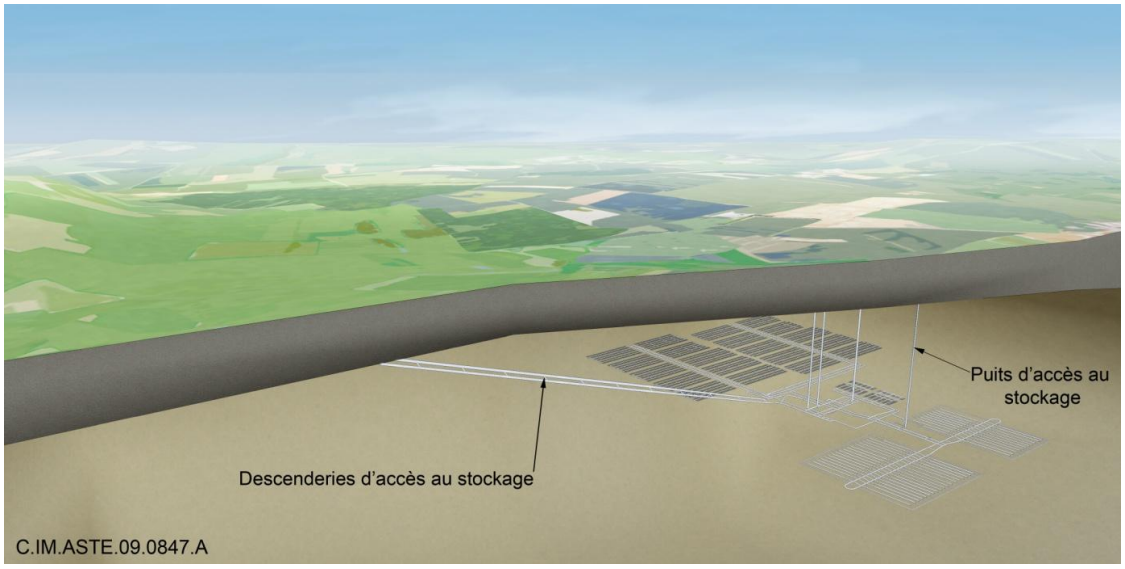


Figure 4.3-12 Représentation schématique du stockage et des liaisons jour-fond

Les puits et leurs scellements

La configuration retenue en référence pour le jalon 2009 considère un groupe principal de liaisons surface/fond centré composé de trois puits (travaux, entrée d'air, personnel) et d'un puits de retour d'air peu excentré en aval de la zone MAVL. Chaque puits comporte un scellement vertical conçu de manière similaire quelle que soit la taille de l'ouvrage (actuellement le diamètre du puits de retour d'air de la zone MAVL est réduit par rapport aux autres puits).

Les scellements de puits comportent, les éléments suivants (Figure 4.3-13) :

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

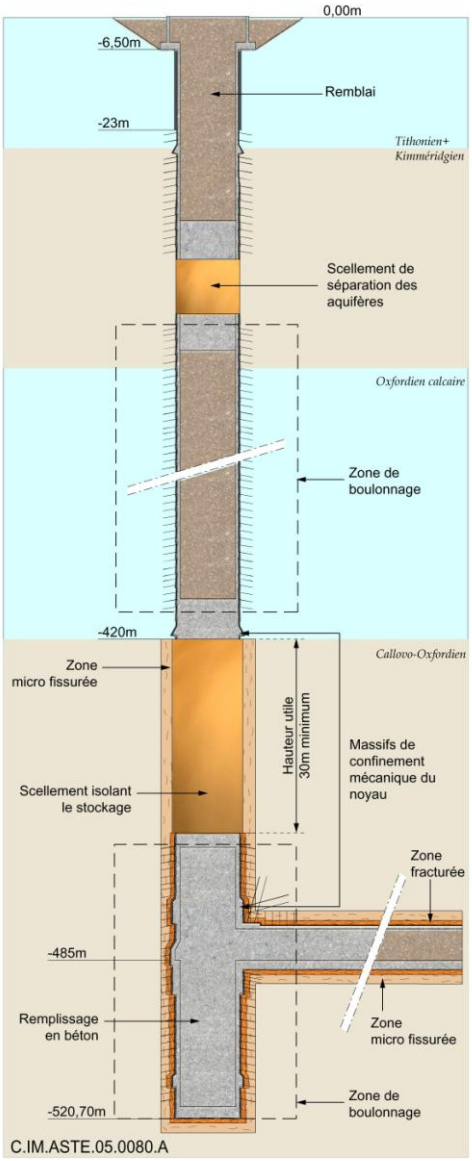


Figure 4.3-13 Coupe schématique d'un scellement de puits

La descenderie

La descenderie (actuellement double-tube) sera plus précisément définie au moment du choix de site et de l'implantation des installations de surface. Au stade du jalon 2009, la solution décrite et sur laquelle sont menées les analyses préliminaires de risque est une descenderie à deux tubes, de pente de l'ordre de 10% et de longueur actuellement définie à 5 km.

La présence de descenderies intervient dans le fonctionnement hydraulique et le transport des radionucléides, notamment en rapport avec le positionnement relatif de l'ensemble des accès par rapport aux zones de stockage et vis-à-vis du gradient horizontal. L'impact potentiel de cette option de conception sur le comportement hydraulique du stockage et le transport des radionucléides est évalué au chapitre 2.6.

Les galeries

Dans les faisceaux de galeries de liaison, le nombre de galerie est de 3 pour les liaisons principales HA et MAVL, et de 2 pour les liaisons secondaires HA et MAVL. Dans la zone MAVL, il s'y ajoute une galerie périphérique de bouclage de retour d'air.

Chaque galerie comprend des soutènements/revêtements dimensionnés pour tenir sur une durée a minima séculaire ce qui permet de limiter l'extension et l'amplitude des déformations de l'EDZ en construction et en exploitation.

A la fermeture, chaque galerie est remblayée et scellée. A long terme, après une dégradation lente des soutènements, ce sont des remblais qui contribuent à limiter les déformations mécaniques de la roche.

Mise en place de scellements peu perméables en galeries

L'objectif visé pour que les scellements puissent réaliser leur fonction est l'obtention d'une perméabilité « équivalente » de l'ouvrage la plus faible possible et suffisamment faible pour que les galeries et les puits ne constituent pas une voie de transfert préférentielle des radionucléides et des toxiques relâchés.

La perméabilité équivalente d'un scellement est estimée en prenant en compte tous les éléments qui le composent soit : le noyau argileux (sa perméabilité mais aussi sa longueur), les argilites au voisinage (incluant la zone endommagée), l'interface noyau/argilite (incluant localement la dépose du soutènement en béton).

Les scellements de galeries comprennent :

- les scellements de module qui permettent un fractionnement de l'inventaire en situation d'intrusion humaine par forage. Par exemple, seules quelques alvéoles sont influencées par un forage dans un module de déchets HA,
- les scellements des sous-zones de déchets HA et des sous-zones de déchets MAVL,
- les scellements à la base des ouvrages de liaison surface/fond soit, à la base des puits et à la base des descenderies.

Tous les scellements de galerie sont conçus de façon similaire : deux types de matériaux sont envisagés pour la réalisation de scellements :

- un noyau à base d'argile gonflante assurant, après sa resaturation et sans limite de durée, le rôle de barrage hydraulique. Quelle que soit sa dimension radiale, le noyau est réalisé sur une longueur pluri-décamétrique (de 40 à 50 mètres),
- des massifs d'appui en béton, assurant une tenue mécanique du noyau argileux afin de garantir un bon déroulement de sa resaturation de façon à développer une pression de gonflement suffisante.

Les scellements de galeries comportent en référence, un noyau argileux complété par des coupures hydrauliques radiales, à intervalles réguliers (Figure 4.3-14). Un massif d'appui en béton non armé est réalisé à chaque extrémité du noyau. Ces massifs ont pour rôle d'assurer le confinement mécanique du noyau gonflant. Chacun de ces deux massifs de béton a une longueur de 4 à 6 m. Les scellements de descenderie sont de conception similaire à celle décrite pour un scellement de galerie de liaison ou un scellement d'alvéole de déchets MAVL.

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

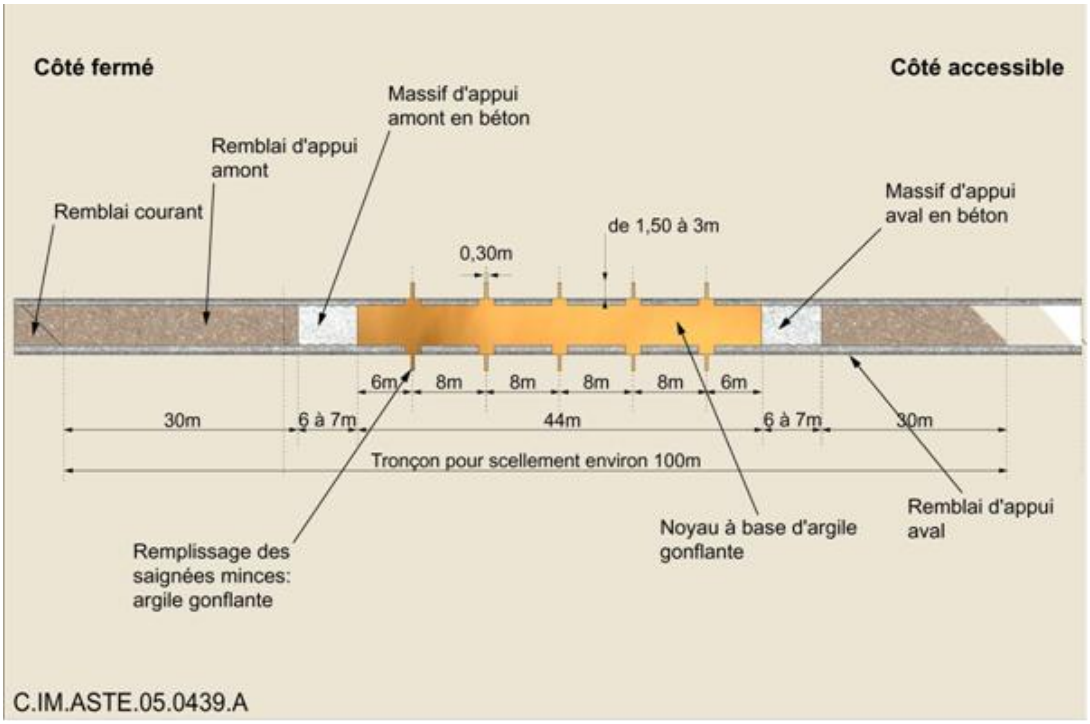


Figure 4.3-14 Représentation schématique d'un scellement de galerie (Andra, 2009c)

L'orientation des galeries destinées à recevoir des scellements, est prise au stade actuel selon la direction de plus grande contrainte (notée sigmaH). Comme indiqué au paragraphe précédent, en fonction des observations qui seront réalisées en laboratoire souterrain, cette contrainte d'orientation pourra être relâchée.

4.4 Maîtrise des incertitudes et robustesse du stockage

Les paragraphes suivants rappellent en préambule les acquis du Dossier 2005, puis présentent les résultats de l'analyse menée en précisant les modalités de gestion des incertitudes à ce stade des études. La réduction des incertitudes se poursuivra en vue de la DAC, les principales pistes de progrès sont listées dans les tableaux qui suivent :

- maîtrise des incertitudes par des choix de conception du stockage au moyen de dispositions qui rendent le système peu sensible à ces incertitudes (cf. chapitre 1),
- maîtrise des incertitudes par des hypothèses permettant d'intégrer l'incertitude dans l'évaluation des performances du stockage en évolution normale (SEN), soit dans le calcul de référence, soit dans les calculs de sensibilité, soit dans un scénario d'évolution altérée (SEA) afin de vérifier que le niveau de sûreté requis reste assuré ou que la dégradation de la performance reste modérée.

Suivant les recommandations de l'autorité de sûreté, l'évaluation de l'impact (à long terme) du stockage a été conduite pour différentes « situations ». Ainsi, elle a d'abord été menée pour un scénario qualifié d'évolution normale (SEN) qui correspond à un ensemble de situations « *certaines ou très probables* ». En complément du SEN, l'évaluation de l'impact a été conduite pour des scénarios qualifiés d'évolution altérée (SEA) correspondant à des situations « hypothétiques ».

L'analyse reprend la typologie des incertitudes retenues dans le Dossier 2005 (Andra, 2005c) qui comprend :

- les incertitudes sur l'inventaire des colis et les caractéristiques de ceux-ci, indépendamment de leur comportement en stockage (par exemple : incertitude sur les quantités ou sur l'inventaire radiologique et chimique),
- les incertitudes sur la connaissance physique du milieu : formation hôte, formations encaissantes, environnement de surface. On distingue celles qui sont dues à la variabilité naturelle des

caractéristiques du milieu géologique à l'échelle de l'emprise d'un stockage, celles qui sont dues aux limites du programme de caractérisation, et celles liées à l'extrapolation sur de longues échelles de temps (évolution géomorphologique à long terme),

- les incertitudes portant sur les caractéristiques intrinsèques d'un composant du stockage, elles peuvent être liées aux imprécisions des techniques de mesure,
- les incertitudes sur les processus régissant l'évolution du stockage. La complexité des phénomènes ne permet pas nécessairement de disposer d'une compréhension détaillée de chaque interaction et contraint à adopter une représentation d'ensemble du milieu qui transcrit au mieux la compréhension du fonctionnement du système. Sont distinguées celles qui relèvent majoritairement de processus hydrauliques, mécaniques, chimiques, radiologiques (et leur couplage), celles affectant le transport des radionucléides, et la thermique, pour laquelle on traite essentiellement de son influence sur les autres phénomènes.
- les incertitudes technologiques. Il s'agit de prendre en compte :
  - ✓ les incertitudes dues à la variabilité des conditions possibles d'exploitation du stockage, soit parce que différentes techniques (par exemple de creusement) existent, soit parce que le schéma d'exploitation peut varier (ordre et rythme de livraison des colis, durée des phases d'observation et de réversibilité). Cette variabilité n'est une incertitude au regard de l'analyse de sûreté que si elle induit une indétermination sur l'état initial du stockage en phase de après fermeture,
  - ✓ celles dues à une limitation des connaissances sur les conditions de mise en œuvre d'une technologie particulière dans un contexte souterrain. Les concepts proposés par l'Andra faisant appel à des technologies éprouvées et bien connues, ces incertitudes sont très limitées et ne renvoient qu'à des opérations très particulières, qui n'ont pas leur équivalent exact dans d'autres secteurs industriels. Ces incertitudes peuvent être liées à un mauvais usage des techniques mises en œuvre pour construire et exploiter le stockage (risque de mauvaise contrôle qualité, risque d'oubli d'une procédure critique) ou liées aux effets des différentes techniques de construction / exploitation possibles sur l'évolution du stockage en phase après fermeture,
- les événements qui peuvent survenir dans l'environnement du stockage. On distingue en général les phénomènes d'origine naturelle se produisant à la surface (événements climatiques de grande ampleur, tectoniques, etc.), et les événements dus à l'action de l'homme (intrusion, effets anthropiques sur le climat et l'environnement).

L'approche intègre les résultats par thèmes ou processus tels que définis ci-avant.

4.4.1 Connaissance du milieu géologique

4.4.1.1 La formation hôte

La couche du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition de Meuse/Haute-Marne présente des caractéristiques favorables au stockage de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue au regard des critères techniques de choix de site définis par le Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (ASN, 2008). La formation hôte s'impose comme un composant essentiel du système dans la mesure où elle contribue à l'ensemble des trois grandes fonctions de sûreté.

Les caractérisations des forages et dans le laboratoire permettent d'apporter suffisamment de confiance dans la connaissance des propriétés de la roche qui contribuent aux fonctions de sûreté avec peu d'incertitudes.

L'état des connaissances sur le milieu géologique permet ainsi de retenir des paramètres dits « phénoménologiques » pour sa représentation en scénario d'évolution normale (SEN) et pour des calculs de performances. Les indéterminations sont essentiellement liées :

- aux techniques de mesures sur échantillon,
- aux limites du programme de caractérisation de la roche au regard de son extension,
- à la représentation des phénomènes de sorption pas le biais d'un coefficient Kd,
- au rôle hydraulique de potentielles diaclases,

- à l'éventuelle présence de structures mineures non détectées.

Le jalon 2009 correspond à la proposition d'une ZIRA, contenue dans la zone de transposition. La confiance dans la connaissance des propriétés de la roche a été renforcée grâce à ces résultats. Les gammes de valeurs possibles sur la zone de transposition (coefficients de diffusion, porosité, propriétés de solubilité et de sorption) ont été précisées (cf. section 4.3.3), restant dans les domaines de valeur du Dossier 2005. Les acquis du programme de reconnaissance confirment l'homogénéité latérale de la formation et une épaisseur de couche qui varie de manière régulière du sud vers le nord est, de 130 à 160 m.

Ces nouvelles connaissances permettent ainsi de revoir les valeurs nominales des paramètres à retenir pour les évaluations quantitatives. C'est l'objectif des évaluations de performances qui ont été conduites sur le Callovo-Oxfordien. Ces évaluations sont basées sur cinq localisations de forage dans la zone de transposition et portent sur trois profils de perméabilité, permettant ainsi de couvrir le domaine de variation de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien et des profils de perméabilité. Les résultats des quantifications sont exposés en section 4.6. Ces évaluations n'ont pas reconduit, à ce stade, l'ensemble des études de sensibilité.

Les alvéoles de stockage sont implantées dans la zone d'argilosité maximale de la formation du Callovo-Oxfordien, ce qui correspond au niveau du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Sur la zone de transposition, ce niveau est situé en partie médiane des argilites du Callovo-Oxfordien ce qui permet de garantir une garde de 60 m au-dessus et au-dessous des alvéoles.

L'implication d'une plus grande longueur d'alvéoles MAVL est intégrée dans les dispositions de conception de manière à préserver cette épaisseur de garde minimum (Figure 4.3-8) tout en tenant compte du pendage de la formation. L'évaluation quantitative menée pour évaluer l'implication de ce dispositif tient compte de ce principe. Il n'est pas prévu d'étude de sensibilité à une épaisseur de garde inférieure tant que ces dispositions de conception sont maintenues.

Pour la DAC, l'analyse sera mise à jour pour prendre en compte les résultats obtenus sur la ZIRA, et les expérimentations au Centre de Meuse/Haute-Marne qui doivent se poursuivre sur des durées plus longues et qui permettront de conforter cette confiance dans les propriétés de la formation hôte (perméabilité, diffusion, rétention) et d'assurer la cohérence des valeurs considérées en regard des performances de confinement du Callovo-Oxfordien. Elles permettront de reconsidérer les études de sensibilité à conduire vis-à-vis de :

- la perméabilité du Callovo-Oxfordien,
- l'ensemble des paramètres liés à la géochimie : coefficient de diffusion, porosité, Kd, et solubilités.

Ces acquis permettront également de reconsidérer :

- la situation de forages à but géothermique. Le contour de cette situation sera à réexaminer pour en définir les contours, notamment en regard de la recommandation du guide ASN (ASN 2008),
- l'éventuelle présence de structures mineures non détectées. Au regard des investigations qui n'ont détecté aucune structure, l'intérêt de traiter le cas particulier d'une hétérogénéité non détectée par un scénario spécifique ne semble pas pertinent. A noter que d'éventuelles structures recoupées ou simplement détectées pendant le creusement pourraient être gérées en adaptant l'architecture du fait de sa modularité.

4.4.1.2 Les formations encaissantes

Le modèle retenu en scénario d'évolution normale, en référence, et les études de sensibilités effectuées autour de ce modèle couvrent les incertitudes sur :

- la caractérisation des propriétés de ces formations, en termes de perméabilité, porosité, coefficient de diffusion,
- la direction des écoulements dans le Dogger,
- l'extension latérale des aquifères.

Les formations encaissantes ne se voient pas attribuer de fonction de sûreté et sont représentées en scénario d'évolution normale avec des hypothèses conservatives. De manière plus globale, les

incertitudes de toutes natures sur le transfert dans les formations encaissantes avaient été couvertes en 2005 par un choix d'exutoires très proches du site, minimisant les temps de transfert dans les formations encaissantes par rapport aux durées de résidence dans la formation hôte.

Les résultats du programme de reconnaissance de la zone de transposition, notamment par une campagne de forages, ont apporté des éléments de connaissance supplémentaires sur les caractéristiques des formations encaissantes :

- la faible perméabilité matricielle des formations encadrant les argilites du Callovo-Oxfordien, notamment des formations calcaires de l'Oxfordien et du Dogger (aquifères dans d'autres parties du Bassin de Paris),
- des écoulements lents du fait des faibles perméabilités,
- la direction des écoulements.

Une représentation plus fine des formations encaissantes est donc à envisager le cas échéant pour la DAC. La démarche de choix des exutoires s'appuiera sur ces nouvelles modélisations en cohérence avec la localisation de la ZIRA.

Les formations encaissantes supérieures peuvent être soumises aux phénomènes d'érosion liés à l'évolution géodynamique interne du site mais également aux évolutions climatiques globales. L'influence de l'évolution géomorphologique sur 1million d'années a été considérée dans le cadre du Dossier 2005 au moyen de simulations intégrant les cycles d'évolutions climatiques potentielles, et les érosions en surface incluant l'évolution géodynamique interne. Les simulations du Dossier 2005 ont ainsi conduit à identifier un nouvel exutoire potentiel à 1 Ma. Le scénario d'évolution normale a examiné l'impact à cet exutoire supplémentaire. Cette approche sera reconduite pour la DAC, en tenant compte de la position de la ZIRA.

4.4.1.3 Modélisation de la biosphère

La biosphère est un des compartiments du calcul qui peut présenter *a priori* l'incertitude la plus forte, du fait du nombre important de paramètres qui la caractérisent et de la multiplicité de ses évolutions possibles. La biosphère n'a pas à assurer de fonctions de sûreté, mais elle constitue le dernier maillon pour modéliser les transferts des radionucléides et des toxiques chimiques vers l'homme depuis une eau potentiellement contaminée et calculer leurs impacts en considérant les différents maillons de la chaîne alimentaire.

Ces incertitudes sont cependant limitées par des choix conventionnels, partagés au niveau international (cf. programme AIEA BIOMASS, AIEA 2003), qui limitent le domaine d'étude. Les choix inhérents à la description de la biosphère reposent sur un certain nombre d'hypothèses, dont plusieurs sont conventionnelles, notamment le choix d'habitudes de vie similaires aux nôtres pour les populations vivant dans un lointain avenir.

Dans le cadre du Dossier 2005, l'approche s'est focalisée sur des habitudes et hypothèses correspondant à une population-type telle qu'observée aujourd'hui dans la région d'implantation. Les incertitudes se ramenaient essentiellement :

- au choix du groupe de référence hypothétique, parmi ceux qui sont possibles compte tenu de son caractère conventionnel et des caractéristiques du site, notamment climatiques,
- aux incertitudes globales sur le facteur de conversion biosphère,
- à la quantification des facteurs de transfert des éléments dans la biosphère, notamment les incertitudes portant sur le calcul du facteur de dose du radionucléide qui domine l'impact, en l'occurrence l'iode 129. Cette incertitude, atteignait pour certains radionucléides, un facteur 10. Les incertitudes qui concernent le chlore 36 ou le sélénium 79, ont également été considérées : un facteur 10, ou plus, d'incertitude sur la dose qui leur est associée influence peu le résultat de l'analyse de sûreté. La comparaison par rapport à la pratique internationale montre par ailleurs que les valeurs retenues par l'Andra sont conformes aux usages.

Le retour des évaluateurs (Andra, 2005c) a conduit l'Andra à consolider son approche vis-à-vis des choix à faire pour décrire les biosphères retenues pour les évaluations (cf. Chapitre 1).

Le choix des biosphères type à considérer pour la DAC, en tenant compte des évolutions climatiques globales, le choix des exutoires, le choix des groupes de référence hypothétiques, leur classe d'âge et leurs habitudes alimentaires s'appuieront sur cette démarche.

Les incertitudes résiduelles liées à la quantification des facteurs de transfert des éléments dans les biosphères à modéliser seront à apprécier au regard des études en cours. Les effets anthropiques (gaz à effet de serre) seront réexaminés, notamment par le biais de simulations prenant en compte les évolutions climatiques globales. En cohérence avec les recommandations de l'autorité de sûreté, le cas particulier de la modélisation d'une biosphère type chaude sera examiné en regard du résultat de ces simulations.

4.4.2 Les colis de déchets

4.4.2.1 Inventaire des colis

Les colis de déchets sont placés sous la responsabilité de leur producteur et/ou détenteur. A de rares exceptions près (cas de déchets de haute activité issus d'anciennes activités telles que la production d'objets au radium), l'inventaire des colis HA-MAVL est issu des industriels de l'électronucléaire et de la recherche associée ainsi que des activités de défense nationale. Les interlocuteurs de l'Andra pour les questions relatives à la maîtrise de l'inventaire des déchets, contenu dans les colis dits primaires sont EDF, AREVA et le CEA.

L'analyse des informations transmises par les producteurs de déchets fait apparaître des incertitudes qui sont de plusieurs ordres :

- des incertitudes relèvent strictement de l'inventaire (en nombre de colis, en radionucléides ou en toxiques chimiques). Elles ont une influence limitée sur les résultats des calculs d'impact. En effet, ces incertitudes sont largement prises en compte par des choix enveloppes au sein du modèle d'inventaire de dimensionnement, MID (Andra, 2009d). S'agissant des données traduisant la vision et les prévisions actuelles des producteurs, le caractère totalement majorant de ce dernier ne peut cependant pas être démontré. En tout état de cause, des variations sur telle ou telle famille de colis ne seraient pas de nature à remettre en cause significativement les calculs,
- des incertitudes concernent le conditionnement du déchet. Pour certains déchets le conditionnement prévisionnel présenté dans le MID peut encore évoluer. Ces changements d'hypothèses de conditionnement peuvent influer notamment sur la thermique, le taux d'irradiation des colis ou le taux d'émission de gaz de radiolyse. Ces incertitudes sont aussi prises en compte par les hypothèses du modèle d'inventaire,
- des incertitudes concernent les cinétiques de formation de certaines substances comme les complexants ou les substances agressives envers leur environnement (cf. incertitudes sur les phénomènes de transport, section 0).

4.4.2.2 Modèles de relâchement des matrices de déchets

<u>Déchets MAVL</u>

Pour ce qui concerne les déchets MAVL, les modèles de relâchement retenus en scénario d'évolution normale sont dans de nombreux cas équivalents à un relâchement instantané, faute de modèle de relâchement spécifique ou d'observations adéquates. Ce modèle labile est le plus pénalisant au regard de l'évaluation de l'impact.

Pour les autres déchets MAVL, qui sont les déchets ayant une matrice métallique (déchets métalliques activés) ou une matrice bitume, un modèle de relâchement spécifique non labile est disponible.

Pour les déchets métalliques, la détermination d'un taux de relâchement se fonde sur l'attribution aux pièces métalliques activées des dimensions les plus faibles parmi celles qui peuvent être rencontrées dans ce type de déchets et par l'attribution d'une vitesse de corrosion choisie comme représentative parmi les vitesses mesurées en situation anoxique. Ces vitesses supposent par conséquent que les colis sont isolés de l'oxydation pendant le temps où les alvéoles y sont soumises (c'est-à-dire pendant la phase d'exploitation et de ventilation de l'alvéole).

Puisque la situation anoxique des déchets métalliques est sensible à plusieurs incertitudes, notamment la présence d'éléments oxydants ou agressifs (H_2O_2, O_2, H_2, OH^-, O_2^-….) issus de la radiolyse de l'eau un

relâchement labile est retenu pour une analyse de sensibilité du SEN pour couvrir plus complètement les incertitudes sur ce point.

Pour les déchets bitumineux, l'aptitude du bitume à immobiliser les radionucléides est traduite par deux modèles de relâchement : COLONBO 2 et COLONBO 3. Ils ont été développés pour décrire le relâchement des radionucléides suite à la reprise d'eau par les sels solubles. Le scénario d'évolution normale retient le modèle COLONBO 3 en référence, et un modèle pénalisant piloté uniquement par la reprise d'eau en étude de sensibilité.

Le modèle COLONBO 3 repose sur la capacité du bitume à contrôler la reprise d'eau et tient compte de la limitation du transfert de l'eau et des ions issus des sels solubles dans la zone perméable ainsi créée, sans prendre en considération la limitation de transfert des radionucléides : ceux-ci sont supposés instantanément solubilisés et relâchés à l'extérieur de l'enrobé. Le processus de dégradation conduit à un relâchement en racine carrée du temps fondé sur l'activité de l'eau à saturation avec les sels solubles du bitume et le coefficient de diffusion de l'eau dans la zone perméable. Les valeurs retenues sont issues de mesures spécifiques.

Déchets HA vitrifiés

Pour les déchets vitrifiés, le passage d'un modèle de dissolution uniquement piloté par la vitesse initiale, utilisé en 2005, vers un modèle de type « $V_0.S \rightarrow V_r$ » apporte un gain appréciable et quantifiable en termes de réduction et de décalage dans le temps de l'impact. Le programme d'expérimentation prévoit l'acquisition de données in situ dans des conditions proches de celles du stockage. Elles permettront une compréhension plus fine des mécanismes. Ils seront intégrés dans les analyses à conduire pour la DAC. Concernant l'adaptation du terme source aux modifications d'environnement liées à un défaut de scellement, un forage ou des conditions de pH modifiées, l'approche consistant à retenir un modèle « $V_0.S$ » a été maintenue pour les quantifications à mener au jalon 2009.

Combustibles usés

Pour ce qui concerne les combustibles usés de Recherche et de Défense, ils sont variés tant dans leur forme physico-chimique que dans leur inventaire radiologique. Afin de couvrir les incertitudes sur le modèle de relâchement qui pourrait leur être applicable, il a été retenu à ce stade des études de les considérer comme labiles.

Toutefois, un programme de recherche et développement sur les combustibles usés de la défense et de la recherche a été défini afin de déterminer leurs termes sources en stockage.

Pour les combustibles de type oxyde, une analyse des données disponibles doit permettre d'établir avec précision la part de combustibles auxquels le modèle de relâchement, retenu pour les combustible REP dans le dossier Argile 2005, est applicable.

Pour les combustibles métalliques, les modèles de relâchement sont en cours d'élaboration. A cet égard, des expériences de lixiviation en eau de site d'une durée de l'ordre d'un an sont prévues sur des échantillons irradiés de combustibles type UNGG et UZr. Les résultats pourront être intégrés dans l'analyse pour la DAC :

- pour les combustibles de type UZr, une première version d'un modèle de relâchement est attendue pour 2011 sur la base des connaissances actuelles et sera confortée fin 2012 suite aux expériences de lixiviation,
- pour les combustibles UNGG, une première version d'un modèle de relâchement est attendue pour 2012 sur la base des connaissances actuelles et sera confortée en 2013 suite aux expériences de lixiviation.

Il convient de noter que les vitesses de corrosion attendues pour UZr sont très faibles, et pourraient même être inférieures aux limites de détection en solution du fait de la faible teneur en uranium.

4.4.3 Les phénomènes régissant l'évolution interne du stockage

4.4.3.1 Phénomènes hydrauliques en champ proche

Tel que mentionné en chapitre 4.2, la maîtrise des circulations d'eau au sein du système de stockage se réfère à la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau ». Elle est assurée par les propriétés de la roche, en particulier, sa faible perméabilité et par l'implantation des ouvrages de liaison surface/fond et leur dispositifs de scellements. Ces dispositions servent les deux objectifs : (i) de limiter des arrivées d'eau et des possibilités de sortie de l'eau hors du système de stockage et (ii) d'imposer un régime de transport diffusif dominant dans la formation hôte.

Ces dispositions permettent de remplir les fonctions de sûreté, même en situation de défaut de scellements. Elles ne permettent cependant pas de s'affranchir du transitoire hydraulique qui se met en place lors du creusement des ouvrages de stockage et de la désaturation qui en résulte.

En se fondant sur l'ensemble des caractéristiques de la formation hôte et de la roche perturbée, les analyses phénoménologiques indiquent que la désaturation reste limitée en paroi d'ouvrage, mais sa quantification renvoie aux caractéristiques de l'EDZ (extension, et perméabilité) et à l'influence des gaz produits notamment par corrosion des éléments métalliques.

En phase après fermeture, les incertitudes relatives à la durée de resaturation pour que le système retrouve son équilibre hydraulique sont gérées par des hypothèses prises dans le scénario d'évolution normale (paragraphe 4.4.3.1, et Tableau 4.4-1). Il s'agit d'une hypothèse de calcul destinée à simplifier la représentation du stockage. Toutes les analyses sur l'évolution du stockage, sur le comportement des composants, sur leur évolution, etc. prennent en compte l'évolution du degré de saturation dans le temps.

L'analyse du Dossier 2005 a conclu que cette hypothèse avait peu d'influence sur le transfert des radionucléides à l'échelle du stockage dans son ensemble ; la désaturation des milieux qui environnent les déchets est favorable au ralentissement de la migration des radionucléides non gazeux, voire à leur immobilisation. Les incertitudes sur le comportement hydraulique (désaturation et extension) sont étudiées in situ en laboratoire souterrain.

La possibilité que des gradients hydrauliques puissent se former entre alvéoles et galeries attenantes du fait de degrés de saturation moindres a été étudié dans le cadre du Dossier 2005 : les alvéoles MAVL étant plus étendues, contenant plus de vides, et étant de plus soumises plus fortement à l'action des gaz que les galeries qui les jouxtent, se resatureront plus tardivement, et des gradients hydrauliques éventuels seraient orientés vers l'intérieur de l'alvéole.

La situation dans les alvéoles de déchets HA dépend du chemisage qui est mis en place (étanchéité ou non) et des gaz qui seront produit. En situation de défaillance d'étanchéité du chemisage, la saturation de l'alvéole est relativement rapide, de l'ordre du siècle.

Les cinétiques de production de gaz, associées à la vitesse de corrosion elle-même entachée d'incertitudes liées notamment aux conditions d'environnement dans l'alvéole avaient conduit selon des calculs conservatifs à une surpression hydraulique.

Dans les alvéoles de déchets HA, les voies de transfert préférentielles de l'hydrogène sont sujettes à incertitudes. En partie utile d'alvéole, dès que les jeux de mise en place sont comblés (après une centaine d'années), les voies de transfert préférentielles se situent soit à l'interface argilites/alvéole soit dans l'EDZ. La compression de l'EDZ, suite au fluage des argilites, réduit les fissures et implique une baisse de perméabilité. Cette baisse n'est pas chiffrée mais peut être de plusieurs ordres de grandeur. L'EDZ ne constitue plus dans ce cas une voie de transfert aussi privilégiée, mais en même temps, une partie de l'hydrogène est évacuée par diffusion ou convection après dissolution dans l'eau de l'argilite. Au niveau de la tête d'alvéole, l'hydrogène passe préférentiellement par le bouchon d'argile et le massif d'appui en béton tant que ces derniers ne sont pas saturés et dans les interfaces constituées par les produits de corrosion. Une incertitude persiste sur la durée de resaturation du bouchon d'argile et du massif d'appui en béton dans le cas d'une alvéole non étanche.

Une approche prudente consiste à retenir une situation de chemisage non étanche. Dans ce cas, une hypothèse d'une représentation « saturée » des alvéoles de déchets HA au regard des incertitudes induites par la resaturation sur les gaz peut potentiellement :

- être sans influence vis-à-vis de la désaturation du milieu géologique, qui reste faible,
- être conservative au regard de l'intérieur de l'alvéole, qui peut être significativement désaturée dans le cas d'une étanchéité du chemisage. Cette situation renvoie à la durée de vie des surconteneurs (cf. section 4.4.5).

Dans les alvéoles de déchets MAVL, il se produit une évolution des conditions redox vers un milieu anoxique puis réducteur en liaison avec la production d'hydrogène. Les incertitudes sur la resaturation sont de plusieurs natures : incertitudes sur l'extension de la désaturation et le degré de saturation des matériaux des ouvrages, incertitudes sur la production de l'hydrogène (les évaluations retiennent des paramètres pénalisants), incertitudes sur l'impact de la production d'hydrogène et de sa pression sur la resaturation, incertitude sur la migration de l'hydrogène hors de l'alvéole au travers des argiles gonflantes du noyau de scellement ou de l'EDZ autour du scellement. Les incertitudes sur la production d'hydrogène sont liées aux incertitudes sur la cinétique de corrosion mais également aux limites (dans le cadre des déchets MAVL) de caractérisation de la surface offerte à la corrosion (influence des fines). Les simulations en cours s'appuient sur des valeurs de production maximisées.

Des incertitudes persistent sur la production et le transfert de l'hydrogène produit par corrosion dans les alvéoles de déchets HA et dans les alvéoles de déchets MAVL. L'analyse renvoie aux incertitudes sur les modalités de resaturation des alvéoles et leur évolution à long terme. Elle renvoie donc à des compléments de connaissances pour une compréhension plus fine des processus et pour s'assurer que les analyses restent bien dans le domaine défini pour le Dossier 2005. En l'attente des résultats, la modalité de gestion des incertitudes est maintenue.

Elle avait conduit en 2005, pour vérifier la robustesse du stockage, à une situation possible de transfert de radionucléides pendant le transitoire hydraulique et sous l'effet de la pression de gaz, en SEN et en scénario d'évolution altérée « défaut de colis ». Elle est destinée à couvrir l'effet des gaz mais est enveloppe a fortiori d'une situation de saturation différenciée.

Tableau 4.4-1 Modalités de gestion des incertitudes concernant le comportement hydraulique

Comportement hydraulique			
Fonctions concernées : 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.			
Composants concernés	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
		Options de conception	**Hypothèses de scénarios**
Architecture, Puits, Descenderies,	Débit d'eau dans les ouvrages sous l'effet de gradients hydrauliques horizontaux (risque de transport convectif)	Puits groupés ou faiblement dégroupés	En SEN régime diffusif dominant. Etudié en SEA défaut de scellement
Tous les ouvrages (puits, descenderie, galeries, alvéoles)	Incertitude sur l'effet des gaz sur la resaturation du stockage. Durée de la phase de resaturation	Architecture d'ensemble avec implantation des ouvrages de liaison et leur scellement.	En SEN le stockage est considéré saturé dès la fermeture du stockage. Etudes complémentaires en cours Durée d'exploitation : Prise à 100 ans dans l'APSS

4.4.3.2 Incertitudes sur les phénomènes mécaniques

Ce paragraphe aborde les incertitudes les plus significatives dans le domaine mécanique, ainsi que les incertitudes sur les couplages hydro-mécaniques. Il aborde le comportement mécanique de la roche hôte en particulier, extension et caractéristiques de la zone endommagée, comportement différé de la zone endommagée, comportement mécanique au contact d'ouvrages en béton, au contact des ouvrages en bentonite, au contact d'ouvrages métalliques et sur la prise en compte de l'effet mécanique des gaz.

Pour rappel, la conception du stockage vise à préserver les propriétés de la formation hôte, notamment en retenant certaines dispositions de conception visant à limiter l'endommagement du « Callovo-Oxfordien ». Les incertitudes d'ordre mécanique sont donc des incertitudes résiduelles liées aux connaissances des caractéristiques de l'EDZ (extension et perméabilité), à l'état au creusement et à son évolution jusqu'à l'échelle du million d'années de la zone endommagée.

Ces incertitudes ont été couvertes en 2005 en scénario d'évolution normale par le choix d'un modèle « phénoménologique » mais associé à des valeurs de paramètres conservatifs, prenant notamment en compte une profondeur maximale du stockage (à 630 m) pour tenir compte du fait que la profondeur du stockage est indéterminée, puisque dépendant de sa localisation.

Le choix de la ZIRA et l'implantation du stockage dans la zone d'argilosité maximale au sein du Callovo-Oxfordien conduisent à revoir cette position.

Les incertitudes sur le modèle d'évolution à long terme sont couvertes par le fait que la roche est en permanence soutenue par les revêtements/soutènements (ou chemisage pour les alvéoles de déchets HA), par le remblai, et par les scellements. Dans ces conditions, une évolution défavorable de la zone fracturée renverrait à une incertitude sur les capacités de soutien d'un de ces composants (dans le cas par exemple d'un manque de soutien par un remblai désaturé).

Une évolution défavorable de la zone endommagée en section courante d'une galerie ou d'un puits ne conduit pas à une situation significativement différente de celle envisagée en SEN, comme l'ont montré les études de sensibilité sur la perméabilité de la zone endommagée. Seule une dégradation de la zone microfissurée au droit des scellements, au-delà de la coupure hydraulique, peut conduire à les court-circuiter. Un tel cas a été envisagé en sensibilité du SEN, et complété par un cas de figure correspondant à une zone fracturée continue le long de la totalité des ouvrages, en SEA « défaut de scellements ».

L'effet mécanique possible des gaz sur la zone endommagée étant a priori réversible, il a été couvert en tout état de cause par l'étude de sensibilité qui suppose une dégradation de la perméabilité de la zone fracturée et de la zone microfissurée. Ce n'est que dans un cas irréaliste, car ne correspondant ni aux constatations expérimentales, ni aux gammes de pression attendues, que pourrait se produire une sur-fracturation de la roche ou des scellements, cas de figure qui serait couvert en SEA « défaut de scellements ».

De cette analyse du Dossier 2005, les défauts de scellements et les possibilités de transfert (d'eau et de gaz) par la zone endommagée sont des situations qui ressortent à plusieurs reprises de l'analyse qualitative. De manière plus générale, les incertitudes sur les caractéristiques de l'EDZ et son évolution dans le temps apparaissent dans la définition de plusieurs situations altérées différentes (cf. Tableau 4.4-2). Elles sont examinées ci-après.

Endommagement initial

Les grands mécanismes qui pilotent le comportement mécanique du stockage (endommagement initial de la roche, développement de la pression de gonflement des matériaux en argile gonflante et expansion des produits de corrosion, fluage des argilites, rééquilibrage global à terme) sont bien identifiés. Les incertitudes portent plutôt sur l'amplitude et la cinétique de chaque phénomène, et donc sur les modèles qui permettent de les prédire. En particulier, l'évaluation de l'extension de l'EDZ est liée essentiellement au choix du modèle rhéologique des argilites. S'y ajoutent de possibles effets d'échelle, dus à la transposition à partir d'échantillons centimétriques. Peuvent également s'y ajouter de possibles effets accompagnant l'avancement du creusement.

Les observations in situ du puits et des galeries expérimentales dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ont permis d'ores et déjà de préciser certains phénomènes et leurs amplitudes, en tenant compte de la forme des ouvrages (section en fer à cheval) et des techniques de creusement (utilisation du brise roche notamment).

D.PL.FSTE.04.0103.C

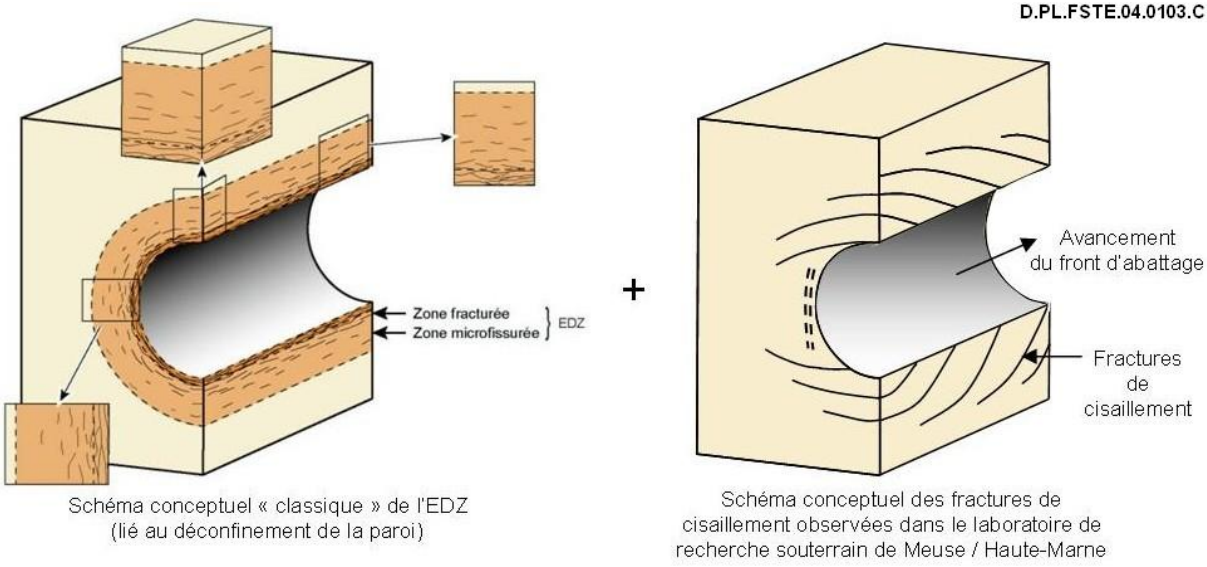


Figure 4.4-1 *Schéma conceptuel de l'EDZ lié au déconfinement de la paroi et schéma conceptuel des fractures de cisaillement observées dans le laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne*

Les essais et mesures réalisés en laboratoire souterrain, confortent les acquis du Dossier 2005 mais impliquent de revisiter le modèle conceptuel pour intégrer une compréhension phénoménologique plus fine de la zone endommagée. En effet, les résultats semblent indiquer que les valeurs retenues dans le cadre du Dossier 2005 pour évaluer l'extension de l'EDZ étaient majorantes. Les incertitudes qui persistent se limitent essentiellement aux valeurs des paramètres rendant compte de l'endommagement initial des argilites et de leur évolution sous l'effet du fluage (perméabilité, extension). Ces acquis et le modèle conceptuel qui en résultent restent néanmoins à valider, notamment sur la base des essais en cours au laboratoire souterrain.

Il a été décidé de reconduire les modalités de gestion des incertitudes sur l'état initial de l'EDZ pour les évaluations quantitatives des performances des dispositifs de conception. Toutefois, la représentation de la zone endommagée dans le SEN de la DAC sera à revisiter pour tenir compte des résultats acquis et en cours au laboratoire souterrain.

L'extension de la zone endommagée est également à revisiter pour tenir compte de la localisation de la ZIRA, et donc de la profondeur potentielle du stockage.

Comportement différé de la zone endommagée

Le comportement à long terme de l'endommagement peut être marqué par un processus de fluage, qui reprend à partir du moment où les argilites sont suffisamment saturées. L'évolution mécanique à long terme de la zone endommagée est un processus dont la cinétique est très lente, et qui accompagne l'évolution des matériaux placés à proximité pour la soutenir. En section courante de galerie, cela concerne le revêtement en béton, et le remblai. Au droit du scellement, le fluage lent de l'argilite est accompagné par le gonflement de la bentonite sous l'effet de la saturation.

Les hypothèses génériques sur l'extension et caractéristiques de l'EDZ, prises en compte dans le scénario d'évolution normale, permettent de couvrir les incertitudes éventuelles sur :

- l'ampleur du phénomène d'auto-cicatrisation, très vraisemblable dans les argilites et déjà observé, mais qui n'a pas encore fait l'objet d'une évaluation quantifiée,
- l'évolution à court terme de l'EDZ et les techniques mises en place pour la soutenir.

En revanche, l'évolution à long terme de la zone endommagée suppose que les matériaux qui sont en contact avec elle assurent son soutien. Elles sont examinées ci-après selon la nature du matériau en contact avec l'argilite.

Comportement mécanique au contact des ouvrages en béton

Pour rappel, l'évolution du Callovo-Oxfordien en paroi de l'alvéole MAVL est contrainte par la présence de soutènements et revêtements en béton et donc de leur évolution dans le temps. L'évolution du béton a été décrite comme une succession d'états chimiques allant du béton « sain » au béton « altéré » puis « dégradé » dans le Dossier 2005. De façon majorante, l'analyse avait conduit à considérer que le béton « dégradé » perd ses propriétés mécaniques. Compte tenu des conditions du milieu, il était évalué que les revêtements et massifs d'appui se dégradent lentement de manière concentrique depuis l'extérieur du massif vers l'intérieur. La perte de tenue mécanique suit un tel schéma, avec une perte progressive en couronne tandis que le cœur du massif préserve ses propriétés (pas d'effondrement). Le report de charge du Callovo-Oxfordien suit un schéma identique, il se fait progressivement vers le cœur du massif au fur et à mesure de la dégradation. Ce phénomène commence dès la phase d'exploitation.

Le revêtement est dimensionné pour des périodes *a minima* séculaires en cohérence avec la durée d'exploitation et les exigences de réversibilité. Après dégradation du béton, l'évolution de la roche est contrainte par la présence du remblai en galeries, ou des colis eux-mêmes dégradés dans les alvéoles de déchets MAVL :

- dans le premier cas, seul un comportement inattendu du remblai pourrait conduire à une évolution non attendue de l'EDZ. Si malgré tout la dégradation du béton venait à se produire plus vite que prévue, sans que le remblai puisse en prendre le relais, l'EDZ pourrait se trouver temporairement déconfinée, et voir sa perméabilité, ou son extension, s'accroître. Cette situation a été jugée peu vraisemblable dans le cadre du Dossier 2005 pour les galeries courantes, compte tenu du fait qu'elle suppose à la fois une saturation forte du revêtement (pour qu'il se dégrade) et faible du remblai,
- dans le deuxième cas, la maîtrise des vides par conception au sein de l'alvéole permettait de limiter un éventuel sur-endommagement de la roche.

Ces situations ont été « couvertes » par une étude de sensibilité en scénario d'évolution normale, envisageant une perméabilité dégradée pour la zone fracturée (équivalente à 10^{-6} m/s, soit la perméabilité d'un sable, et à 5.10^{-9} m/s pour la zone microfissurée, moins directement exposée).

Une augmentation des taux de vide dans les alvéoles MAVL, en lien avec l'évolution des modes de manutention, est à examiner, en particulier, à long terme, quand les colis de stockage n'assurent plus un rôle de soutien mécanique. Les vides à prendre en compte sont à la fois ceux dus aux jeux de mise en place, mais également ceux internes aux colis primaires, ainsi que la porosité des matériaux. Des études sont en cours, notamment en lien avec l'observation et la surveillance des ouvrages, pour appréhender la reprise des vides par l'argilite et s'assurer qu'elle reste dans le domaine des hypothèses prises pour le Dossier 2005.

Comportement mécanique au contact des ouvrages de liaison

Pour les ouvrages de liaison, cette situation renvoie à un manque de soutien par un remblai désaturé ou tassé. L'analyse avait alors conclu qu'une évolution défavorable de la zone endommagée en section courante d'une galerie ou d'un puits ne conduit pas à une situation significativement différente de celle envisagée en sensibilité du SEN par valeur de perméabilité dégradée. La conception des scellements avec remblai et béton d'appui permet de limiter une éventuelle propagation d'une déformation liée à un manque de soutien des soutènements ou du remblai. Pour ce type de situation, seule une dégradation de la zone microfissurée au droit des scellements, au-delà de la coupure hydraulique, avait été envisagée. Les modalités de gestions avaient considéré cette éventualité par un calcul en sensibilité du SEN vers des valeurs dégradées, et couverte en tout état de cause par la situation de défaut de scellement représenté par une zone fracturée continue le long de la totalité des ouvrages.

Concernant les dispositifs de scellements, la conception prévoit au stade du jalon 2009 les mêmes dispositions. La conception des puits de retour d'air est similaire à celle des puits principaux. Il n'apparait pas d'incertitudes spécifiques à ce dispositif par rapport au scellement de puits du Dossier 2005. La conception des scellements de descenderie est similaire à celle des galeries de liaison,

l'analyse s'appuie ainsi sur celle réalisée pour un scellement de galerie. L'analyse de sûreté des ouvrages destinés à recevoir des scellements, et des scellements eux-mêmes reprend donc les conclusions du Dossier 2005. L'implication des dispositifs de scellements de nouveaux éléments est néanmoins examinée dans le cadre des situations à traiter dans le scénario défaut de scellement (cf. section 4.5).

Des acquis de connaissance (grâce notamment aux essais en laboratoire souterrain) confortent les premières observations sur la cicatrisation hydraulique de l'EDZ. Si ces éléments sont consolidés, ils pourraient conduire à envisager de nouvelles valeurs de perméabilité de la zone endommagée. Des évaluations de performance ont été menées dans ce sens et montrent qu'une évolution des valeurs de perméabilité vers des valeurs moins dégradées améliore la performance des scellements.

Le passage de 4 à 2 galeries dans la zone de déchets HA se traduit par un diamètre excavé augmenté par rapport à celui du Dossier 2005. L'extension de la zone endommagée associée sera prise en cohérence avec les modèles.

Comportement mécanique au contact d'ouvrage en bentonite

La réhydratation de la bentonite des scellements provoque son gonflement. Après resaturation, le noyau argileux exerce une pression sur l'argilite. Cette pression de gonflement radiale contribue à limiter la convergence.

Le Dossier 2005 avait conclu qu'il ne pourrait donc y avoir déconfinement de la roche qu'en situation extrême de dégradation du noyau argileux qui ne pourrait alors plus développer la pression de gonflement. Compte tenu de la capacité de gonflement de la bentonite, cette situation semblait très peu vraisemblable, même en supposant que le scellement puisse être perturbé par des conditions chimiques peu favorables. Le choix avait cependant été fait de retenir une situation de mauvais gonflement de la bentonite parmi les situations pouvant conduire au scénario d'évolution altérée « défaut de scellements ». Dans un tel cas, le défaut de soutien de la roche est représenté par un sur-endommagement (prise en compte de paramètres défavorables pour la zone fracturée et la zone endommagée) autour de l'ensemble des scellements.

Il avait également été noté qu'un gonflement excessif du scellement pourrait endommager la roche. Cependant, les pressions estimées pour que cela se produise sont très fortes (supérieures à 12 ou 13 MPa). Les caractéristiques de la bentonite permettent d'empêcher un tel phénomène. Les incertitudes sont très faibles à ce sujet. Si une telle situation se produisait néanmoins, elle se traduirait par une zone fracturée continue autour des scellements.

Une situation de dimensionnement non maîtrisé des scellements, bien que très peu vraisemblable, est retenue, à titre conventionnel, pour la définition du scénario d'évolution altérée « défaut de scellements ». Elle conduit à un sur-endommagement de l'EDZ autour de l'ensemble des scellements.

Une expérimentation est prévue in situ en laboratoire souterrain pour tester la performance d'un scellement en galerie. Les conclusions du Dossier 2005 seront revisitées le cas échéant au regard des résultats obtenus.

Contact avec les éléments métalliques (alvéoles de déchets thermiques)

Dans le cas particulier des alvéoles de déchets HA la zone endommagée est au contact direct du chemisage métallique, lui-même proche du conteneur. Les produits de corrosion de ces matériaux sont expansifs, et pourraient développer des pressions s'exerçant sur le milieu géologique. Les coefficients d'expansion attendus pour ce type de produits, ainsi que les jeux résiduels au sein de l'alvéole, sont a priori suffisants pour empêcher des actions mécaniques défavorables.

La conclusion du Dossier 2005 était qu'en tout état de cause, le calcul de sensibilité effectué en SEN vers des valeurs pénalisantes de perméabilité de la zone fracturée en section courante d'alvéole (10^{-6} m/s, zone fracturée assimilée à un sable) couvre tout effet potentiel non anticipé.

Une difficulté spécifique était posée par le retrait, lors de la fermeture, d'éléments mis en place à la construction. Le retrait du chemisage en tête des alvéoles de déchets vitrifiés et la mise en place du

bouchon en argile gonflante définitif apparaissaient délicats, avec le risque que cela déconfine la formation hôte.

La référence du concept en 2009 prévoit le maintien du chemisage en tête d'alvéole. L'incertitude sur le potentiel sur-endommagement lié au retrait est donc levée par cette disposition de conception. La zone endommagée initiale au droit du bouchon est ainsi définie sur les mêmes hypothèses que celle développée au droit de la partie utile de l'alvéole. Son évolution sera étroitement liée à la durée d'exploitation et de ventilation des galeries d'accès, et des perturbations chimiques qui peuvent se développer.

Les incertitudes résiduelles relatives à la zone endommagée sont similaires à celles retenues pour la partie utile de l'alvéole, c'est à dire :

- incertitudes sur le comportement différé de l'EDZ,
- incertitude sur la production et le transfert de l'hydrogène produit par corrosion, notamment en regard de la durée de resaturation du bouchon,
- incertitude sur le comportement hydraulique et mécanique de l'argile gonflante, notamment en lien avec le schéma de resaturation.

Ces incertitudes sont gérées par des hypothèses du scénario d'évolution normale, et par une étude de sensibilité vers des valeurs dégradées de perméabilité.

Le maintien du chemisage en acier non allié en tête d'alvéole induit une interface avec un composant métallique qui n'existait pas dans le Dossier 2005. Du fait de la présence de ce composant métallique, l'évolution à long terme de la nouvelle interface est l'objet d'indéterminations, ses caractéristiques sont à définir.

Sur la base des conclusions du Dossier 2005, les fonctions hydrauliques du bouchon ne devraient pas être remises en cause du fait d'une alvéole borgne et de conditions hydrauliques (diffusives dominantes) imposées par les scellements de galeries (Andra, 2005c).

Concernant les perturbations chimiques liées au bouchon en béton et au bouchon métallique, elles sont prises en compte dans son dimensionnement (3 mètres de longueur). En situation normale les extensions de perturbations sont limitées, l'extension de la perturbation alcaline est inférieure au mètre, et l'extension de la perturbation fer-argile est de l'ordre du décimètre. La partie non perturbée conserve une géométrie et des dimensions suffisantes pour que le bouchon puisse assurer ses fonctions. Cependant, certaines situations de cumul de perturbations incluant l'effet des gaz avait conduit à retenir une situation de défaut de bouchon représentée par une mauvaise interface et en sensibilité une perméabilité dégradée du bouchon argileux. Cette situation a été prise en compte dans les évaluations quantitatives présentées en section 4.6.

Le bouchon, du fait de sa faible porosité, permet de limiter le transfert des colloïdes ou des produits de corrosion hors de l'alvéole. Une incertitude persiste sur le rôle de ces colloïdes et produits sur le transfert des radionucléides en situation de défaut de scellements. Le devenir des produits de corrosion formés en tête d'alvéole demande une étude plus détaillée. Des expérimentations en cours au laboratoire souterrain sur les phénomènes de corrosion apporteront des éléments sur les processus mis en jeu.

4.4.3.3 Effet mécanique des gaz

L'analyse menée en 2005 avait considéré un sur-endommagement par effet des gaz sur la zone endommagée, bien que peu vraisemblable. En effet, l'état des connaissances d'alors n'avait pas permis d'exclure totalement un effet de microfissuration irréversible. Cette éventualité avait été couverte par une sensibilité du SEN par une valeur de perméabilité dégradée de la zone endommagée. C'est à titre conventionnel qu'un cas de sur-fracturation de la roche ou des scellements avait été envisagé en SEA « défaut de scellements » bien que jugé irréaliste car ne correspondant ni aux constatations expérimentales, ni aux gammes de pression attendues.

Au stade actuel, des incertitudes sur la production et le transfert de l'hydrogène produit par corrosion persistent. Néanmoins, aucun cas de sur-fracturation n'a été mis en évidence. L'analyse indique que

l'hydrogène passe par le bouchon d'argile et le massif d'appui tant qu'ils ne sont pas saturés et dans les interfaces constituées par les produits de corrosion. Des actions complémentaires sont en cours, incluant des simulations et des tests en laboratoire souterrain pour conforter ces analyses.

Tableau 4.4-2 Modalités de gestion des incertitudes relatives au comportement mécanique

Comportement mécanique				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
			Options de conception	**Scénarios**
Tous les ouvrages, (puits, descenderies, galeries, alvéoles)	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	Variabilité de la profondeur d'implantation du stockage au stade actuel	Implantation au maximum d'argilosité (proche du milieu de la couche)	En SEN, extension de l'EDZ par modèle conservatif en fonction de la profondeur. prise à 630m pour être enveloppe au jalon 2009, dépendra ensuite de la ZIRA (<600m).
Tous les ouvrages, (puits, descenderies, galeries, alvéoles)	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	Extension de la zone endommagée à court terme après creusement	Possibilité de limitation par orientation des alvéoles et des galeries destinées à recevoir des scellements selon la direction de contrainte majeur (sigmaH)	En SEN, extension évaluée par modèle conservatif en fonction de la profondeur. prise à 630m pour être enveloppe au jalon 2009, dépendra ensuite de la ZIRA (<600m).
Tous les ouvrages, (puits, descenderies, galeries, alvéoles)	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	Perméabilité initiale de la zone endommagée à court terme après creusement	Possibilité de limitation par orientation des alvéoles et des galeries destinées à recevoir des scellements selon la direction de contrainte majeur (sigmaH)	La fissuration hydrique sous l'effet de la désaturation des zones ventilées est un phénomène réversible : sensibilité au SEN sur la perméabilité de la zone endommagée vers des valeurs dégradées. Etudes complémentaires en cours.
Alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Modèle de comportement différé de la zone endommagée. Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Pose d'un chemisage pour la tenue mécanique de l'alvéole. Minimisation des vides.	En SEN, l'endommagement initial est représenté constant sur la période d'analyse (sans cicatrisation). Etudes complémentaires en cours.
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Modèle de comportement différé de la zone endommagée Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Maintien du chemisage en tête d'alvéole	Etudes complémentaires en cours. Couvert par SEA défaut de scellement.
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Effets des produits de corrosion issus du chemisage en tête d'alvéole.		Etudes complémentaires en cours. Couvert par SEA défaut de scellement.

Comportement mécanique				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
			Options de conception	**Scénarios**
Alvéole de déchets MAVL	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Modèle de comportement différé de la zone endommagée. Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Possibilité de limitation par orientation des alvéoles favorable vis-à-vis des contraintes naturelles (selon sigmaH), si nécessaire. Pose d'un revêtement et soutènement pour la tenue mécanique de l'alvéole. Minimisation des vides.	En SEN, l'endommagement initial est représenté constant sur la période d'analyse, correspondant à la décharge initiale. Etudes complémentaires sur l'évolution de la zone endommagée d'alvéoles de déchets MAVL.
Scellements de modules/zones de stockage, galeries de liaison principales	S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides Préserver les caractéristiques de la formation hôte	Modèle de comportement différé de la zone endommagée Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Par conception : orientation si nécessaire des galeries selon sigmaH, pas de boulons en paroi. Etude de dispositifs d'ancrage des scellements destinés à interrompre une zone trop perméable.	En SEN, l'endommagement initial est représenté constant sur la période d'analyse, correspondant à la décharge initiale. Etudes complémentaires en cours.
Massif d'appui des scellements et bouchon	Via le scellement : s'opposer à la circulation d'eau	Effet pluriséculaire de l'attaque sulfatique Modèle de dégradation des bétons	Par conception, formulation adaptée du béton.	En SEN, pas de performance vis-à-vis du transfert. Etudes complémentaires en cours.
Noyaux argileux de scellements et bouchons en argile d'alvéoles HA	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	Amplitude de l'effet de re-compression de la bentonite sur l'argilite Capacité de gonflement de la bentonite sous l'effet des eaux calciques	Par conception, adaptation de la densité de compaction de la bentonite pour obtenir la pression de gonflement souhaitée.	Un gonflement insuffisant pourrait limiter l'efficacité du bouchon, et un gonflement trop important pourrait créer un sur-endommagement : traités en SEA défaut de scellement. Etudes complémentaires en cours.
Alvéole de déchets HA, bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage.	Effet du couplage thermo-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites Effets du couplage thermo-mécanique dans la bentonite	Température de l'alvéole et de l'argilite est limitée à moins de 100°C par densité de stockage, (espacement entre alvéoles, nombre de colis par alvéole, intercalaires).	En SEN, les effets sont considérés comme réversibles du fait des températures, limitées par conception. Une sensibilité vers des valeurs de perméabilité conservatives de la zone endommagée. Etudes complémentaires en cours.
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA, scellement de zone, de galerie de liaison principale	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Effet mécanique des gaz dans les argilites Effet mécanique des gaz dans l'argile des bouchons et scellements.		Effets réversibles, couvert par SEA défaut de scellement. Etudes complémentaires en cours.

Comportement mécanique				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
			Options de conception	**Scénarios**
Revêtements et remblais de galeries	Via le scellement : s'opposer à la circulation d'eau.	Insuffisance des spécifications du remblai en argilites au regard des performances mécaniques attendues à long terme Effet pluriséculaire de l'attaque sulfatique sur les bétons Mise en place non maîtrisée du remblai conduisant à un soutien insuffisant de la roche	Pose de soutènements en paroi d'ouvrage qui limitent l'extension de l'EDZ (pendant exploitation) Formulation spécifique du remblai d'appui pour obtenir un coefficient de frottement suffisant.	Le scellement repose sur un massif d'appui et un remblai en béton. S'il devait être mal conçu, alors le scénario défaut de scellement couvrirait ce cas de figure.
Surconteneur HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Contraintes mécaniques et thermomécaniques supportées par les surconteneurs en fonction du temps	Dimensionnement de l'épaisseur du conteneur ou surconteneur est définie en fonction de la vitesse de corrosion et de la durée de vie nécessaire. Chemisage assurant la tenue mécanique de l'alvéole	En SEN, modèle de corrosion conservatif.
Scellement de puits	S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites. Modèle de comportement différé de la zone endommagée Effet mécanique des gaz dans les argilites et dans la bentonite.	Implantation du scellement de puits dans la zone géomécanique A, plus favorable. De plus, une éventuelle zone fracturée de faible extension pourrait être retirée avant mise en place du scellement de puits.	En SEN, zone fracturée non représentée, l'endommagement initial de la zone microfissurée est représenté constant sur la période d'analyse, correspondant à la décharge initiale Effets des gaz réversibles. A titre conventionnel : irréversibilité de la microfissuration éventuellement due aux gaz dans les argilites. Elle pourrait conduire à un sur-endommagement autour du scellement, traité en SEA défaut de scellement

4.4.4 La connaissance des transitoires et des couplages

La représentation des transitoires hydraulique, thermique, et mécanique est suffisante pour procéder à l'évaluation de sûreté et garantir le caractère conservatif des évaluations de performances conduites. Le Dossier 2005 a cependant conclu qu'une meilleure connaissance et une modélisation plus fine des transitoires constituent un axe de progrès important, afin de préciser les conditions d'évaluation de la sûreté du stockage et d'identifier les marges de conservatisme.

La problématique des transitoires est indissociable de celle de la modélisation des couplages, qu'elle recoupe largement. Nombre d'expérimentations en cours au laboratoire souterrain produiront des résultats pour une meilleure compréhension de ces phénomènes.

Le transitoire hydraulique, dans le cadre du Dossier 2005, a mis en évidence le rôle prépondérant dans les premiers millénaires de la production et de l'évacuation des gaz, et des couplages mécaniques associés. L'évaluation de sûreté au stade du Dossier 2005, a retenu des études une production de gaz importante liée à une cinétique rapide de corrosion. Ce point a été discuté en section 4.4.3.1.

Le transitoire thermique est maîtrisé par conception, par l'étanchéité des conteneurs dans les alvéoles pendant la phase thermique. On note cependant que l'évaluation de sûreté a besoin de prendre en compte, dans une approche dictée par la logique de défense en profondeur, la possibilité que des conteneurs soient défaillants. Cela ouvre la question des transferts en ambiance thermique, sujet sur lequel des données ont été recueillies expérimentalement et utilisées pour les évaluations de 2005.

4.4.4.1 Incertitude sur les couplages : comportement hydromécanique et thermo-hydromécanique

Les évaluations menées dans le cadre du Dossier 2005 montrent qu'en plus des voies d'accès potentielles que constituent les ouvrages de liaison après remblaiement et scellement, la zone d'argilites endommagées par le creusement en paroi d'ouvrage constitue elle aussi une voie de passage de l'eau (et du gaz) potentielle.

Des dispositions de conception doivent donc viser à la limitation de cette zone endommagée, notamment en paroi des ouvrages destinés à recevoir des scellements. Ces dispositions concernent l'orientation, si nécessaire, des galeries selon la direction de plus grande contrainte (notée sigmaH), la pose de soutènements ou de chemisage, pas de boulons en paroi ou boulons de dimension limitée, taux de vide limité.

Les incertitudes sur le comportement mécanique ont également motivé des dispositifs de conception spécifiques au niveau des scellements de par la possibilité d'interrompre l'EDZ par une « coupure hydraulique » dont les longueurs permettent d'interrompre « hydrauliquement » la zone fracturée ; et par un traitement spécifique de la surface endommagée (nettoyage de la paroi lors de la dépose du soutènement par exemple). La Figure 4.3-14 illustre ce type de dispositif qui pourrait être mis en place pour un scellement réalisé en galerie. Les coupures hydrauliques consistent en des saignées minces à intervalles réguliers remplies d'argile gonflante.

L'analyse des fonctions de sûreté en phase après fermeture repose sur les caractéristiques intrinsèques des composants (et leur éventuelles interactions) en examinant les éventuelles incertitudes résiduelles associées à ces dispositifs.

Des incertitudes résiduelles subsistent après l'adoption des dispositions de conception, ce sont :

- celles liées aux caractéristiques de la zone endommagée : son extension à court terme, sa perméabilité, et son évolution à l'échelle du million d'années. Ces incertitudes sont gérées en scénario d'évolution normale par le choix d'un modèle « phénoménologique » mais associé à des paramètres conservatifs, prenant notamment en compte une profondeur maximale du stockage dans la zone de transposition,
- celles liées aux taux de vide des alvéoles de déchets MAVL et leur éventuelle influence sur la zone endommagée. Les jeux fonctionnels entre colis, en lien avec leurs modes de manutention, induit un taux de vide potentiellement augmenté par rapport à celui considéré en 2005 (qui était limité à 4-5%). Le taux de vide par rapport à la section excavée est de l'ordre de 10% (incluant le revêtement en béton, mais pas le vide des colis primaires). L'évolution de la zone endommagée dépend de la reprise des vides par l'argilite après fermeture. L'influence sur l'évolution à long terme de la roche autour des alvéoles doit être analysée plus en avant pour s'assurer, en particulier, que les épaisseurs de gardes intactes restent disponibles (voir section précédente),
- celles liées au maintien du chemisage en tête d'alvéole de déchets HA. Par cette disposition, l'incertitude sur le potentiel sur-endommagement lié au retrait est donc gérée par conception. La zone endommagée initiale localisée au droit du bouchon sera donc définie sur les mêmes hypothèses que celle développée au droit de la partie utile de l'alvéole et en conséquence les mêmes incertitudes résiduelles quant à ses caractéristiques initiales de perméabilité, extension et son comportement différé (voir Tableau 4.4-2),
- celles liées aux dispositifs de scellements : la conception considérée en référence ne prévoit pas d'évolution des dispositions de conception des scellements, et garde les principes retenus en 2005. Ces principes sont appliqués aux nouveaux scellements de puits de retour d'air et de descenderies de conception respectivement similaires aux scellements de puits principaux et aux scellements de galeries. L'analyse de sûreté des ouvrages destinés à recevoir des scellements, et les ouvrages de scellements repose ainsi en grande partie sur les conclusions du Dossier 2005.

Pour les alvéoles de déchets HA, les progrès ont porté sur une meilleure description et le cas échéant une quantification (i) des modalités de chargement mécanique du chemisage des alvéoles HA en lien avec les déformations des argiles en paroi des alvéoles et/ou la saturation des jeux fonctionnels de mise en place du chemisage et (ii) de saturation interne de l'alvéole couplée à la production et la migration d'hydrogène, dans le cas d'un chemisage non étanche. Ces connaissances permettent in fine de mieux évaluer les conditions d'environnement physico-chimiques du chemisage et des surconteneurs, donc des modalités de leur corrosion. Il reste néanmoins des incertitudes sur :

- le comportement hydraulique et thermo-hydro-mécanique des alvéoles HA,
- sur l'effet de la charge thermique sur les processus hydrauliques et mécaniques,
- sur le comportement différé de l'EDZ, notamment en lien avec l'incertitude sur la contrainte radiale exercée par le bouchon argileux lors de son gonflement.

Des mesures et essais sont en cours dans le laboratoire souterrain pour une compréhension plus fine de ces phénomènes. En l'attente des résultats, les modalités de gestion de ces incertitudes sont reconduites :

- soit par des études de sensibilité de perméabilité de la zone endommagée vers des valeurs dégradées,
- soit par la prise en compte de facteurs correctifs pour les éléments pour lesquels le Kd diminue et en utilisant des coefficients de diffusion effectifs des anions et des cations conservatifs majorés d'un facteur 2 vis-à-vis des effets thermiques,
- soit dans un cas extrême, par un SEA défaut de scellement qui couvre les effets d'ampleur extrême, voir le Tableau 4.4-2.

Pour les alvéoles de déchets MAVL, les progrès ont porté sur (i) les temps et les amplitudes caractéristiques du couplage entre la charge thermique (bien que faible pour MAVL) et la ventilation, et (ii) le devenir de l'hydrogène en lien avec les solutions de conception (galerie de retour d'air). Les incertitudes résiduelles sont essentiellement liées au couplage hydro-mécanique, plus particulièrement sur la cinétique des phénomènes et peu sur la phénoménologie en elle-même. Ces incertitudes sont couvertes dans le SEN en prenant en compte une EDZ qui se développe initialement autour des ouvrages et qui n'évolue ni en extension, ni en intensité.

4.4.4.2 Incertitudes sur les couplages thermiques

L'objectif visé, en cohérence avec le guide ASN, est de se prémunir d'éventuels effets irréversibles sur la roche, mécaniques ou chimiques et de limiter l'influence de la température sur les spéciations et les modes de migration des radionucléides en ambiance thermique.

En protégeant les colis sur la durée nécessaire, les éventuelles incertitudes sur la prise en compte des couplages induits par la thermique du stockage, potentiellement importantes, sont réduites très significativement par les dispositions de conception :

- limitant la température des colis de stockage entrant dans le stockage,
- espaçant les colis par des intercalaires (qui peuvent être des colis de stockage de même dimension et non thermiques),
- mise en place d'un surconteneur,
- séparation de la zone MAVL et HA.

Pour les colis de déchets HA vitrifiés, la conception prévoit un surconteneur pour empêcher les transferts en ambiance thermique en réponse à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage ». La durée de cette phase est au plus de l'ordre du millénaire, il convient en effet d'éviter un relâchement de radionucléides aussi longtemps que la température ne permet pas de rendre compte, de manière fiable, du comportement de ces radionucléides, compte tenu des limites actuelles de connaissances.

Cette disposition permet également de protéger le verre d'un risque d'accroissement, pour une température supérieure à une cinquantaine de degrés, de son altérabilité au contact de l'eau, en lien avec les modèles de comportement aujourd'hui considérés. Cette fonction est remplie par un surconteneur qui isole le colis de verre de l'eau pendant la durée de la phase thermique.

Les connaissances sur le comportement des radionucléides en température ont évolué mais les acquis ne permettent pas à ce stade de s'affranchir de la présence d'un surconteneur. Cette solution technologique est donc maintenue. La conception est similaire à celle du Dossier 2005, le dimensionnement est conçu pour être étanche pendant la phase thermique (c'est-à-dire a minima 1000 ans) avec des marges permettant de couvrir les incertitudes chimiques (corrosion), mécaniques et radiologiques.

La durée de vie du surconteneur est très sensible aux conditions d'environnement dans l'alvéole de déchets HA. Les dispositions de conception prévoient un chemisage qui assure une fonction de stabilité mécanique de l'alvéole et de protection mécanique du surconteneur pendant la période de réversibilité et pendant toute la phase thermique en exploitation et après fermeture. Une fonction d'étanchéité est demandée au chemisage pendant la phase d'exploitation réversible.

A noter qu'afin de limiter l'influence thermique de la zone de déchets HA qui sont fortement exothermiques, la garde entre la zone de déchets HA et les autres zones de stockage est augmentée à 250 m.

Les incertitudes résiduelles associées aux effets thermiques sont donc de fait limitées :

- au couplage thermo-mécanique sur l'évolution de l'endommagement de la roche et de la bentonite des scellements mais dont les effets sont réversibles ; en champ proche des alvéoles les interactions thermomécaniques, bien que couvertes par le scénario d'évolution normale, pourraient, si elles étaient d'une ampleur plus forte qu'attendu, donner lieu à des situations altérées couvertes par le SEA « défaut de scellements »,
- aux incertitudes sur l'évolution des équilibres d'adsorption avec la température, mais géré par sensibilité du SEN (cf. Tableau 4.4-3). La prise en compte de conteneurs défaillants, dès le stade du scénario d'évolution normale, conduit cependant à devoir envisager des transports en phase thermique. Dans ce cadre, des premières données issues d'expérimentations en conditions représentatives ont été prises en compte (coefficients de diffusion, coefficients de partage…). La prise en compte d'un scénario de défaut de colisage plus généralisé que ce qui est pris en compte en SEN, et la comparaison de ses résultats avec ceux du scénario de référence, permet de juger de la sensibilité de l'impact à ce type de données.

Des tests in situ en laboratoire souterrain sont conduits, notamment pour étudier les interactions thermo-mécaniques. En l'attente des résultats, les modalités de gestion de ces incertitudes associées aux effets thermiques sont reconduites (voir Tableau 4.4-3).

Tableau 4.4-3 Modalités de gestion des incertitudes résiduelles relatives aux effets thermiques

Effets thermiques				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
			Options de conception	**Scénarios**
Alvéole de déchets HA, bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA Scellements de module (dans les galeries de zone de déchets HA) et scellement de zone HA. Callovo-Oxfordien hors zone endommagée	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage.	Evolution des équilibres d'adsorption avec la température, dans les argiles et argilites Evolution du coefficient de diffusion et de la porosité des argilites et argiles avec la température	Option d'un surconteneur étanche pour empêcher les transferts en ambiance thermique. Température limitée à 90°C (densité de stockage, espacement des alvéoles et des colis, intercalaires)	Dans le SEN, pour les cas de conteneurs défaillants, il est proposé d'appliquer un facteur correctif pour les éléments pour lesquels le Kd diminue (Be, Ca et CS). Pris en compte de manière préliminaire au travers d'un calcul de sensibilité sur le coefficient de diffusion Acquis de connaissance en cours au laboratoire souterrain du (CMHM)

Effets thermiques				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
			Options de conception	**Scénarios**
Bouchon en argile, Noyau argileux de scellement	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	Effets du couplage thermo-mécanique sur la bentonite	Température limitée à 90°C (densité de stockage) Option d'un surconteneur étanche pour empêcher les transferts en ambiance thermique.	En SEN les effets sont considérés comme réversibles du fait des températures limitées par conception.
Bouchon d'alvéole de déchets HA Callovo-Oxfordien en paroi d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Effet du couplage thermo-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Température limitée à 90° (densité de stockage) Option d'un surconteneur étanche pour empêcher les transferts en ambiance thermique. Maintien du chemisage en tête d'alvéole	En SEN, représentation de la zone endommagée, l'extension de l'EDZ reste constante sur la période d'analyse. Couverte par les études de sensibilité vers des valeurs de perméabilité dégradées (in fine serait couverte par le SEA défaut de scellement).

4.4.5 Incertitudes sur l'évolution à long terme des matériaux

L'analyse traite de l'évolution des matériaux exogènes une fois qu'ils sont placés au sein de la roche hôte. Si celle-ci peut avoir une influence sur leur évolution, le phénomène en question est mentionné. Les perturbations induites en retour par les matériaux sur la roche sont évoquées dans un deuxième temps.

Corrosion

Le comportement à long terme des éléments métalliques (chemisages, conteneurs, différents éléments tels que les ferraillages, boulonnages, etc.) est dominé par la corrosion. A court terme, celle-ci peut être influencée par les conditions transitoires régnant au sein du stockage (transitoire redox, transitoire thermique, etc.). Elle dépend aussi de l'homogénéité chimique au sein des alvéoles.

Les modalités de corrosion (généralisée, par piqûre…) et les vitesses associées ont fait l'objet d'études abondantes tant en France qu'à l'étranger, dans le cadre des études sur le stockage des déchets radioactifs ou dans d'autres contextes. De manière générale, à conditions physico-chimiques définies, des valeurs enveloppes des vitesses constatées ont été retenues.

L'incertitude porte en revanche sur les conditions dans lesquelles la corrosion des composants métalliques du stockage va se dérouler. La conception du stockage prévoit des dispositions permettant d'une part d'assurer cette homogénéité, d'autre part de favoriser des conditions anoxiques, qui limitent les vitesses. Pour prendre en compte les incertitudes résiduelles sur les conditions de corrosion, trois modèles avaient été définis par l'Andra. C'est le modèle conservatif qui avait été retenu en SEN.

Les recherches scientifiques menées cherchent à réduire la plage d'incertitude sur les vitesses de corrosion de l'acier non allié. Les approches retenues sont à la fois des approches théoriques (par exemple le couplage avec la modélisation en milieu insaturé) et expérimentales. Les expérimentations in situ viseront à placer des matériaux métalliques dans des conditions aussi proches que possible de celles du stockage mais également à évaluer la durée de présence de l'oxygène dans les ouvrages et ses conséquences. Une telle réduction permettrait de revoir à la baisse les évaluations de montée en pression des gaz de corrosion, et à travers elle leur influence sur le transitoire hydraulique autour des ouvrages de stockage. Par ailleurs, le schéma d'évolution globale des transferts de fluide dans le stockage doit être précisé par une meilleure connaissance des différentes voies de migration de l'hydrogène. Ces données permettront également de conforter le comportement du surconteneur en

condition de stockage qui est dimensionné vis-à-vis de la corrosion pour être étanche sur une période de 1000 ans.

Interactions/perturbations chimiques

Les principales incertitudes relevées vis-à-vis des perturbations chimiques portent sur leurs extensions et non sur les processus mis en jeu. En effet, la conception du stockage fait appel à un nombre limité de types de matériaux, dont le comportement physico-chimique a fait l'objet d'études nombreuses et pour lesquels on peut disposer d'analogues plus ou moins anciens. Cela permet de constituer un corpus de connaissances sur le comportement en stockage de ces matériaux, qui permet d'en prévoir et d'en modéliser le comportement.

Les perturbations chimiques sont évaluées dans des conditions conservatives et traitées, si elles ne sont pas négligeables, par conception (soit en supprimant la source de la perturbation, par exemple en déposant le revêtement à proximité des scellements de galerie – soit en sur-dimensionnant des épaisseurs « perdues », comme par exemple pour les bouchons d'alvéoles). Elles ne sont donc pas représentées explicitement en scénario d'évolution normale.

Le comportement à long terme des matériaux (bétons, aciers) est bien appréhendé, un programme de recherche important ayant été accompli. Les conditions de stockage (milieu réducteur, diffusif, homogène) sont favorables à la prise en compte de durées de vie longues avec une confiance importante. Pour autant, au titre des incertitudes résiduelles, l'analyse de sûreté prend en compte de manière systématique la possibilité que, localement ou de manière globale, les durées de vie des matériaux soient plus courtes que prévu, même par les modèles les plus conservatifs.

Compte tenu qu'il s'agit de mécanismes se déroulant sur le long terme, et que les incertitudes sur les extensions peuvent être associées à d'autres incertitudes (sur les conditions de transport qui régissent le transfert de espèces chimiques agressives, sur le cumul des effets de perturbations différentes), on prévoit cependant par principe de couvrir en scénario d'évolution altérée des situations de défaillance des scellements et/ou de dégradation de l'EDZ qui peuvent trouver leur origine dans des perturbations chimiques d'ampleur excessive (donc non générée par conception).

C'est le cas pour le bouchon d'alvéole de déchets HA. Un ensemble d'incertitudes qui prises séparément ont une influence faible sur les performances du bouchon peuvent lorsque combinées les dégrader de manière significative. Concernant le bouchon d'alvéole de déchets HA, on rattache :

- les incertitudes sur la composition des eaux interstitielles qui saturent la bentonite, ce qui peut conduire à un gonflement moins important que prévu,
- les incertitudes sur l'extension des perturbations chimiques.

Une étude de sensibilité du SEN dans laquelle les propriétés de transfert et de rétention chimique de la bentonite sont conservatives couvre ces incertitudes qui dégradent la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » au sein du bouchon argileux.

Un effet cumulé de perturbations chimiques sur le bouchon argileux introduisant une interface nouvelle pourrait se traduire par une interface imparfaite. Pour rappel, dans le Dossier 2005, pour prendre en compte la possibilité, très peu probable selon les évaluations conduites, d'une propagation du panache alcalin à travers le bouchon d'alvéole défaillant, et jusqu'aux premiers colis de déchets vitrifiés, on considère un relâchement accéléré, au moins pour le colis le plus proche du bouchon, dans un environnement de pH supérieur à 9. Il n'existe pas de modèle pour représenter directement un tel relâchement. On choisit de le prendre en compte en étude de sensibilité en appliquant à tous les déchets vitrifiés (ce qui est très pénalisant) une vitesse de dissolution conservative et un taux de fracturation de 40, huit fois plus fort que pour le modèle de référence. Cela conduit à une dissolution complète du verre en quelques siècles, équivalente de fait à un relâchement labile au regard des temps de transfert dans la formation hôte ou dans les ouvrages d'accès. Cette étude est conduite conjointement avec des paramètres dégradés de l'EDZ et une perméabilité élevée de la bentonite (10^{-9} m/s au lieu de 10^{-11} m/s en référence). Cette étude de sensibilité est menée pour la situation « tous scellements défaillants » et à titre illustratif pour la situation « scellements de puits défaillants ».

Cette situation a été prise en compte dans les évaluations quantitatives présentées en section 4.7.

Des essais en laboratoire souterrains permettront d'apporter des éléments d'information sur le comportement d'une alvéole de déchets HA en conditions de stockage et de conforter la faible extension des perturbations chimiques.

L'incertitude qui persiste est liée à l'influence des colloïdes et produit de corrosion, sur le transfert des radionucléides, en particulier, ceux formés en tête d'alvéole. Ces incertitudes renvoient aux études de sensibilités conduites pour couvrir l'influence de substances complexantes sur le transport de radionucléides.

Tableau 4.4-4 Modalités de gestion des incertitudes relatives aux perturbations chimiques du stockage

Interactions et perturbations chimiques				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
			Options de conception	**Scénarios**
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Extrapolation des effets de la perturbation fer-bentonite des hautes températures / temps courts vers les basses températures / temps longs Extension de la perturbation alcaline dans les argilites Extension de la perturbation alcaline dans la bentonite Effet cumulé des perturbations chimiques	Mise en place d'un bouchon argileux dimensionné pour tamponner les perturbations alcaline et fer/argile	En SEN, épaisseur du bouchon argileux fortement reminéralisée non prise en compte pour la rétention chimique. Prises en compte en SEA défaut de scellement (perméabilité dégradée du bouchon argileux).
Scellements d'alvéoles de déchets MAVL, scellements de modules/zones de stockage	S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Extension de la perturbation alcaline dans les argilites Extension de la perturbation alcaline dans la bentonite Capacité de gonflement de la bentonite sous l'effet d'échanges d'ions avec le calcium. Incertitude sur la composition des eaux interstitielles	Dépose du revêtement en béton à l'emplacement des coupures hydrauliques Longueur du noyau argileux décamétrique prend en compte une zone perturbée	En SEN, épaisseur du noyau argileux fortement reminéralisée au contact du massif d'appui non prise en compte pour la rétention chimique. Prises en compte dans le SEA défaut de scellement.
Scellement de puits	S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Extension de la perturbation alcaline dans les argilites Extension de la perturbation alcaline dans le noyau argileux du scellement	Dépose du revêtement en béton sur toute la hauteur du noyau argileux	En SEN, épaisseur du noyau argileux fortement reminéralisée au contact du massif d'appui non prise en compte pour la rétention chimique.

4.4.6 Incertitudes sur les phénomènes de transport

La thématique relative au transport des solutés a déjà été abordée dans la section consacrée aux phénomènes hydrauliques. L'analyse du Dossier 2005 a abordé dans cette thématique, d'une part la possibilité de transport de radionucléides sous forme gazeuse, d'autre part le transport colloïdal.

Le transport sous forme gazeuse

Le transport sous forme gazeuse concerne les radionucléides susceptibles de migrer sous forme gazeuse après fermeture du stockage. L'effet des gaz produits par corrosion ont été évoqués dans les paragraphes précédents.

Dans l'analyse du Dossier 2005, les radionucléides ayant des vies courtes avaient été exclus, comme ceux présents en trop faible quantité. L'iode 129 et le chlore 36 qui se dissolvent facilement dans les conditions de stockage n'avaient pas été retenus. Seul le carbone 14 mobilisable sous forme de gaz (CO_2 et CH_4) lorsqu'il est en valence IV avait fait l'objet d'une étude. Les résultats avaient alors montré, que même en SEA tous scellements défaillants le carbone 14, de période 5730 ans, avait décru avant de pouvoir sortir du système de stockage. Il n'avait donc pas été retenu.

Cette approche sera reconduite pour conforter ces résultats.

Le transport colloïdal

Le Dossier 2005 avait conclu que compte tenu de la faible porosité du milieu environnant les alvéoles, les colloïdes qui ne seraient pas retenus en champ proche, notamment par le bouchon, seraient filtrés par les argilites saines, caractérisées par leur faible porosité.

Tant qu'un régime diffusif prédomine, la taille de la plupart d'entre eux ne leur permet donc pas de migrer significativement. Seules des molécules de petite taille (de l'ordre de quelques nanomètres) pourraient progresser par diffusion dans la bentonite et les argilites, mais du fait de leur forte capacité d'échange avec le milieu ambiant, elles ne parcourraient pas des distances significatives dans le milieu sans subir d'interactions chimiques les immobilisant ou les désolidarisant du radionucléide qu'elles transportent.

Dans ces conditions, les incertitudes portent sur la possibilité que ce transport colloïdal puisse s'effectuer dans une éventuelle zone fracturée non colmatée, ou dans la bentonite non encore saturée. Elles se ramènent à la possibilité de migration dans un milieu présentant une porosité importante (par exemple une EDZ très dégradée) et sous l'effet de conditions de transport convectives.

Dans le cadre du Dossier 2005, les scénarios d'évolution altérée « défaut de scellements » et « forage », envisagent une étude de sensibilité dans laquelle le transport au sein de l'EDZ fracturée s'effectue sans propriétés de rétention chimique (sorption nulle, solubilité infinie) pour les radionucléides qui font l'objet du calcul. On peut noter que, dans un tel cas, les argilites saines jouent un rôle de « barrière absorbante », sorbant les radionucléides qui pourraient a priori progresser dans l'EDZ et empêchant ainsi leur transfert.

Un tel phénomène avait été jugé représentatif de ce qui se produirait pour un transport par des colloïdes minéraux de petite taille, qui finiraient par entrer dans les argilites et y subiraient des interactions importantes du fait de la capacité d'échanges cationiques du milieu. Les colloïdes de plus grande taille, tels que les amas d'actinides, ne peuvent se transporter sur des distances significatives sans se désolidariser.

Tableau 4.4-5 Modalités de gestion des incertitudes résiduelles relatives aux phénomènes de transport.

Phénomènes liés au transport				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
			Options de conception	**Scénarios**
Alvéoles de déchets HA, bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Préserver les caractéristiques de la formation hôte	Incertitude sur le rôle chimique des produits de corrosion vis-à-vis de la silice	Mise en place d'un bouchon argileux à faible porosité	Cette incertitude est prise en compte en SEN considérant une capacité de sorption de la silice par les produits de corrosion et en négligeant tout apport extérieur de silice Etudes complémentaires en cours
Alvéoles de déchets MAVL	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Préserver les caractéristiques de la formation hôte	Incertitude sur les complexants organiques relâchés par certains colis primaires MAVL.	Les complexants organiques sont inhibés par l'environnement alcalin : le colis de stockage, le revêtement et soutènement assurent un milieu alcalin Répartition des colis dans des alvéoles (modules) dédiées, isolés des autres par une garde d'argilite. Distance de garde entre modules de 60m pour leur indépendance phénoménologique (notamment vis-à-vis des complexants), prise égale à la garde verticale d'argilites.	En cas de défaut de scellement, représenté en première approche par une sensibilité sur le Csat (infini) dans la zone fracturée Etudes complémentaires en cours.
Alvéoles de déchets HA, bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA Alvéoles de déchets MAVL	Retarder et atténuer la migration des radionucléides Préserver les caractéristiques de la formation hôte	Incertitude sur le rôle chimique des produits de corrosion vis-à-vis du transfert des radionucléides Incertitude sur le rôle chimique des colloïdes vis-à-vis du transfert des radionucléides	Par conception en interposant un milieu argileux autour des alvéoles (argilites et bouchon en argile ou argilites et noyau argileux de scellements)	Prise en compte en défaut de scellement, représenté en première approche par une sensibilité sur le Csat (infini) dans la zone fracturée. Etudes complémentaires en cours

Les substances complexantes

La nature des déchets MAVL est diverse et certains déchets peuvent engendrer, au cours de leur dégradation, des substances complexantes susceptibles de mobiliser les radionucléides ou toxiques chimiques. Dans le cadre du Dossier 2005, les incertitudes sur le rôle de certaines substances, soit complexantes vis-à-vis des radionucléides, soit agressives envers leur environnement, pouvant être présentes dans des familles du modèle d'inventaire ont été couvertes au premier ordre par la conception du stockage. La fonction « filtrer les colloïdes » conduit à interposer un milieu faiblement poreux autour des alvéoles de stockage:

- la formation hôte du Callovo-Oxfordien, formation géologique peu poreuse,
- la limitation de l'endommagement et la fermeture des alvéoles par des scellements interrompant la zone fracturée (zone de transport potentielle de ces substances).

Le rôle de ces substances sur la migration des radionucléides est encore incertain. En interposant une garde d'au moins 60 m (correspondant à la garde retenue pour le Dossier 2005), on peut s'affranchir de l'influence de ces substances entre deux modules ou zone de stockage. Des études scientifiques sur les possibilités de transfert via des substances organiques naturelles et via des substances issues de la dégradation des déchets sont en cours. Elles s'appuient notamment sur des observations en

laboratoire souterrain incluant par exemple les effets de l'oxygène sur les matières organiques, qui permettront de mieux appréhender les processus mis en jeu (cf. section 0).

Les incertitudes résiduelles qui persistent sur l'influence de ces substances sont liées au transport potentiel par la zone endommagée en situation de défaut de scellement. Des études de sensibilité sur la solubilité des éléments, hypothèses conservatives car elles conduisaient à retenir des solubilités infinies ont montré que l'influence est mineure du fait de la longueur des galeries et de la possibilité de diffuser dans le Callovo-Oxfordien.

La reconcentration des éléments fissiles

Le risque de criticité à long terme dépend des possibilités de déplacement des éléments fissiles. Ce risque est évalué sur la base des connaissances scientifiques actuelles. Il s'agit de pouvoir justifier de la maîtrise de la sûreté criticité du stockage à partir de la phase de fermeture du stockage et si besoin, d'en identifier des exigences spécifiques à cette phase du stockage (taux de vide maximum de l'alvéole, limite de masse par colis de stockage ou autres…).

La maîtrise des incertitudes relatives à la reconcentration des éléments repose sur la connaissance de l'évolution des alvéoles de stockage (géométries des colis et des alvéoles, de la localisation de la matière fissile…) et des incertitudes associées. Ainsi, sur la base de ces scénarios d'évolution des alvéoles qui seront décrits pour la DAC 2014, il s'agit d'évaluer les possibilités de reconcentration de la matière fissile à la suite d'une éventuelle migration puis de retenir pour les calculs, les géométries les plus défavorables possibles (sous forme de sphères), dans un milieu saturé en eau et des études de sensibilités sur certains paramètres seront évaluées.

Enfin, pour ce qui concerne les conséquences d'un accident de criticité (postulé de manière déterministe), en particulier, les effets thermiques et mécaniques sur le stockage, elles ont été évaluées dans le cadre du dossier Argile 2005 pour le cas des combustibles de réacteur à eau sous pression civil au titre de la gestion des incertitudes résiduelles associées aux études de criticité et afin de répondre à une demande de l'ASN. Il convient de noter que les combustibles UOx REP ne sont plus inclus dans le modèle d'inventaire du stockage. L'Andra n'envisage pas d'autres études d'accidents sur des colis de combustibles CU3 pour la DAC 2014. L'Andra s'appuiera sur l'étude déjà réalisée afin d'indiquer les conséquences sur le stockage d'un éventuel accident de criticité. En effet, Il convient de rappeler, que l'objectif de l'étude d'un accident de criticité a été d'estimer les ordres de grandeurs des phénomènes physiques qui pourraient être engendrés par un accident ainsi que les éventuels effets sur l'installation de stockage. Ainsi, l'étude a montré que les conséquences (thermique et mécanique) sur le stockage sont pilotées par les hypothèses retenues pour l'initiation de l'accident (rampe d'insertion de réactivité) qui sont difficilement justifiables. Toutefois, il convient de noter que d'une part l'étude indique une élévation de la température des encaissants admissible (de l'ordre de 20 à 30 °C) dans le cas d'un scénario réaliste, d'autre part que, pour tous les scénarios considérés, la quantité de radionucléides à vie longue et mobiles formés est faible comparé à l'inventaire initial considéré.

4.4.7 Incertitudes technologiques

Les incertitudes sur la mise en œuvre des techniques prévues pour la construction des ouvrages de stockage ou la mise en place des colis sont réduites par la stratégie même qui a été adoptée, qui consiste à s'appuyer en premier lieu sur des technologies éprouvées dans des contextes miniers ou nucléaires.

Dans un tel contexte, les incertitudes recensées à ce stade se rattachent :

- à certaines techniques qui, bien que déjà mises en œuvre dans l'industrie ou déjà testées expérimentalement, sont en partie spécifiques du stockage et ne sont pas fréquemment utilisées dans d'autres contextes industriels. Dans le cadre d'une analyse de sûreté cherchant à couvrir de manière la plus large possible les incertitudes, il est était apparu opportun d'envisager la possibilité que ces technologies soient, ponctuellement au cours de l'exploitation du stockage, mal maîtrisées,

- à des problèmes de contrôle qualité dans la mise en œuvre d'une technologie, c'est-à-dire l'obtention, du fait de causes aléatoires, d'un résultat non conforme aux attentes, bien que la technologie elle-même ait été validée (par exemple un défaut dans la fabrication d'un colis),
- à des effets induits par d'éventuels accidents susceptibles de se produire durant la phase d'exploitation qui pourraient avoir une influence sur la sûreté à long terme (par exemple en endommageant la roche). Ces problématiques n'ont pas été spécifiquement abordées à ce stade.

Les technologies envisagées par l'Andra s'appuient à la fois sur des pratiques couramment mises en œuvre dans des contextes industriels proches, et sur des essais de démonstration conduits au niveau international. Les programmes en cours devraient permettre d'apporter un certain nombre de précisions sur les conditions dans lesquelles les opérations pourraient être conduites.

C'est, par exemple, le cas pour les scellements. L'Andra bénéficie en la matière du retour des expérimentations TSX[45], conduite laboratoire souterrain (URL) au Canada, et Key menée au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. L'expérience Key notamment a montré l'efficacité hydraulique d'une saignée recoupant la zone fracturée. Les résultats de ces expérimentations sont mis à profits pour la mise en œuvre d'une nouvelle expérimentation visant à réaliser un scellement et évaluer sa performance. Ces tests permettront également d'envisager ou non des pistes qui pourraient par exemple permettre la dépose du soutènement en béton de la galerie avant d'y réaliser un scellement ce qui favoriserait un bon contact entre le noyau argileux et l'argilite. L'incertitude technologique résiduelle identifiée dans le cadre du Dossier 2005 sur la réalisation des saignées sera alors à réexaminer.

De manière générale, la représentation du SEN prend en compte une réalisation correspondant à un dimensionnement « a minima » des composants : durée millénaire pour les surconteneurs de déchets vitrifiés, performance d'ensemble des scellements faible, pas de performance de rétention du remblai.

Par ailleurs, des défauts ponctuels de réalisation ne peuvent être exclus, pas plus que dans n'importe quelle installation industrielle. Une démarche systématique a consisté à :

- prendre en compte au niveau du SEN des défauts ponctuels pour les ouvrages réalisés en plus grand nombre (bouchons d'alvéoles et conteneurs),
- prendre en compte des défauts plus systématiques, comme relevant des situations altérées.

Les situations de défauts ponctuels de surconteneurs seront réexaminées pour la DAC, notamment en lien avec l'analyse conduite pendant la phase d'exploitation et de réversibilité. De même les situations de défaut de scellement pourront être réexaminées si la conception de ces ouvrages devait être optimisée.

4.4.8 Incertitudes sur la durée et les modalités de la phase d'exploitation et d'observation

La phase d'exploitation et d'observation est le siège de phénomènes physico-chimiques, certains similaires à ceux qui se déroulent ensuite lors de la phase après fermeture, d'autres provoqués par les conditions particulières d'un stockage ouvert et ventilé. Ces phénomènes peuvent être importants pour la sûreté à long terme du stockage dans la mesure où ils déterminent l'état de celui-ci au début de la phase après fermeture. De fait, la possible variabilité des conditions d'exploitation peut entraîner une indétermination sur l'état initial d'évolution du stockage après fermeture.

Les phénomènes retenus pour l'analyse sont :

- la désaturation de la roche et des matériaux du stockage, plus ou moins importante en fonction de la durée pendant laquelle les ouvrages sont ventilés. La vitesse de désaturation décroît cependant avec le temps ; en particulier, une fois qu'il s'est opéré dans la zone fracturée des alvéoles, ce phénomène ne progresse que lentement dans la zone microfissurée et l'argilite saine à l'échelle pluriséculaire. De plus, le degré de saturation des ouvrages n'apparaît pas comme un paramètre essentiel du SEN,

[45] TSX : Tunnel Sealing Experiment

- l'incertitude sur le temps d'établissement de conditions anoxiques dans les alvéoles de déchets MAVL et HA ; la fermeture des alvéoles conduit à l'arrêt d'apport d'oxygène. Le maintien dans le temps de conditions oxydantes peut conduire à une accélération de la corrosion des composants métalliques du stockage ou des déchets qu'ils contiennent – notamment, par exemple, des surconteneurs et du chemisage d'alvéole HA. Les dispositions de conception prévoient des solutions pour en limiter les effets, notamment :
  - ✓ en fermant les alvéoles HA au moyen d'un capot amovible qui limite le renouvellement d'air pendant la phase d'exploitation. Le choix d'un bouchon métallique étanche permet de limiter les échanges avec l'air de la galerie,
  - ✓ en prenant en compte dans le dimensionnement des épaisseurs d'acier du surconteneur des colis de stockage, et des phases oxydantes (longues),
  - ✓ en fermant les alvéoles par un bouchon argileux afin de maintenir des conditions d'environnement favorables dans l'alvéole.
- l'oxydation des argilites conduisant à de possibles transformations minéralogiques et notamment à la production de sulfates par oxydation de la pyrite. Les sulfates pourraient s'avérer agressifs, notamment au regard des bétons. Compte tenu des masses de béton en jeu, celles-ci sont à même de résister à une telle attaque. Par ailleurs, l'oxydation peut également provoquer des transformations de la matière organique contenue dans les argilites en très faible quantité. Cela peut provoquer la formation de colloïdes, mais à des teneurs qui ne sont pas significatives au regard du transfert des radionucléides,
- la carbonatation des bétons, provoquée par leur exposition prolongée à l'air, et qui induit une fragilisation de leur structure. Ce phénomène progresse par front au sein des bétons, et ses effets (diminution de la porosité par précipitation de calcite) tendent à ralentir au fur et à mesure sa cinétique de progression. Son extension n'est que décimétrique au plus à l'échelle d'un siècle d'exploitation. Elle serait à observer dans le cadre de l'entretien des revêtements. Elle ne concerne pas les massifs d'appui, qui sont installés au moment de la fermeture,
- les risques d'accélération de la corrosion des composants métalliques du stockage – essentiellement les surconteneurs de déchets HA - par le maintien dans le temps de conditions oxydantes. On a vu qu'ils peuvent être gérés par conception en fermant les alvéoles au moyen d'un capot amovible qui limite le renouvellement d'air. Des phases oxydantes longues peuvent par ailleurs être prises en compte si nécessaire dans le dimensionnement des épaisseurs d'acier,
- l'augmentation des contraintes mécaniques sur les structures du stockage, avec le fluage progressif de la roche. Les surconteneurs HA étant dimensionnés pour des durées millénaires, sont robustes vis-à-vis des incertitudes sur la vitesse de fluage de la roche et la durée d'exploitation. La question concerne surtout les revêtements en béton des alvéoles MAVL et le chemisage des alvéoles HA. Ils sont toutefois résistants sur des durées pluriséculaires, voire au-delà. La réduction de l'incertitude sur les vitesses de fluage de la roche permettra, dans une éventuelle phase ultérieure du projet, de préciser les conditions d'évaluation de cette durée et d'optimiser le dimensionnement du revêtement.

Le scénario d'évolution normale du Dossier 2005 a pris en compte un stockage exploité pendant une durée séculaire. Il en est de même pour les options de 2009, mais il sera vérifié pour la DAC si des hypothèses s'en trouvent modifiées, dans l'hypothèse où le stockage serait exploité et laissé ouvert plus longtemps.

Plus généralement, le programme d'observation du stockage lors de son exploitation permettra d'évaluer l'endommagement des structures, d'identifier si des phénomènes non anticipés se produisent, et d'intervenir au titre de la maintenance préventive ou corrective.

Tableau 4.4-6 Incertitudes résiduelles liées aux conditions d'exploitation

Conditions et durée d'exploitation				
Composants concernés	**Fonction(s) de sûreté concernée(s)**	**Incertitudes**	**Modalités de gestion**	
Callovo-Oxfordien Tous les composants ouvragés	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	Incertitude sur la durée et les conditions de la phase d'exploitation Incertitudes sur la durée de la phase de resaturation.	Architecture d'ensemble et implantation des ouvrages avec scellements multiples qui maîtrisent la circulation des eaux	En SEN, le stockage est considéré saturé dès le début de la phase après fermeture Etudes complémentaires en cours Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Surconteneur HA Chemisage, Bouchon métallique	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Incertitude sur la durée et les conditions de la phase d'exploitation Incertitude sur les conditions d'environnement dans l'alvéole (conditions redox)	Influence sur la vitesse de corrosion limitée par conception par dimensionnement du surconteneur, pose d'un capot étanche à l'entrée de l'alvéole, puis d'un bouchon argileux pour maintien des conditions favorables dans l'alvéole Etude de la possibilité d'un chemisage étanche	Un modèle de corrosion généralisée conservatif est retenu en SEN (c'est à dire un transitoire redox de courte durée) avec en référence une vitesse de corrosion phénoménologique et avec une sensibilité à la vitesse de corrosion adoptant une valeur conservative. Etudes complémentaires en cours Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Soutènement, Revêtement, et remblai de galeries	Via scellement : S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Incertitude sur le comportement différé de la roche Incertitude sur la géochimie des eaux Incertitude sur modèle de dégradation des bétons Incertitude sur l'effet pluriséculaire de l'attaque sulfate	Dimensionnement des soutènements pour une durée séculaire	Endommagement de la formation hôte couvert par la sensibilité au SEN vers des valeurs dégradées de la zone endommagée Des essais avec démonstrateur de mise en place du remblai. Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Massifs d'appui de scellements	Via scellement : S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	incertitude sur le comportement différé de la roche Incertitude sur la géochimie des eaux Incertitude sur modèle de dégradation des bétons Incertitude sur l'effet pluriséculaire de l'attaque sulfate	Dimensionnement des massifs d'appui pour tenir à la pression de gonflement du noyau argileux	Le SEA défaut de scellements. couvre implicitement tout phénomène affectant les massifs en béton. Des essais en laboratoire souterrain Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Alvéole de déchets MAVL	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	incertitude sur le comportement différé de la roche Incertitude sur la géochimie des eaux Incertitude sur modèle de dégradation des bétons Incertitude sur l'effet pluriséculaire de l'attaque sulfate	Dimensionnement des soutènements, revêtement pour une durée a minima séculaire (période d'exploitation et réversibilité)	Des études complémentaires en cours Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation

4.4.9 Evénements externes

Le guide de sûreté (ASN, 2008) recommande de considérer pour les analyses de sûreté :

- une situation de référence correspondant à l'évolution prévisible de l'installation de stockage et du milieu géologique sous l'effet des événements certains ou très probables. Ce sont :
  - ✓ les événements liés à la présence de l'installation de stockage, aux défauts de réalisation et à l'ensemble des processus de dégradation progressive des colis et des composants ouvragés,
  - ✓ un ensemble d'événements naturels probables (cycles climatiques, subsidence, surrections, mouvements sismiques).
- des situations dites altérées correspondant à l'occurrence d'événements incertains, mais plausibles, soit naturels, soit liés aux actions humaines, qui se superposent à la situation de référence et peuvent conduire à une accélération de la migration de substances radioactives entre le stockage et la biosphère.

Les événements naturels d'ampleur exceptionnelle (séisme, événements climatiques) ont été abordés dans l'analyse qualitative. Ils ne font pas a priori l'objet d'un calcul spécifique mais sont intégrés dans la définition des scénarios. L'intrusion humaine fait l'objet d'études dans tous les pays qui se consacrent à la sûreté des stockages profonds. Il n'est, par nature, pas possible de prévenir totalement ce risque, ni d'en annuler les effets. En revanche, des dispositions efficaces peuvent être prises pour en réduire l'occurrence ou la gravité : le choix d'un site sans ressources naturelles exceptionnelles, le fractionnement du stockage en zones indépendantes, constituent de telles dispositions. On a vu que la préservation de la mémoire du stockage par divers moyens permet de prévenir l'intrusion involontaire, mais qu'on ne peut se reposer indéfiniment sur elle. La quantification de l'impact du forage sera à revoir selon les nouvelles dispositions de conception, un fois l'implantation du stockage arrêtée pour la DAC. En effet, la localisation d'un éventuel forage devra considérer la présence de galeries de retour d'air, d'alvéoles MAVL plus longues, et le maintien du chemisage en tête d'alvéoles de déchets HA.

Le choix du site et la conception du stockage permettent par ailleurs de négliger ou de limiter fortement l'impact d'autres événements : volcanisme, diagenèse, sismicité.

Volcanisme

Ce risque est écarté par conception, du fait d'un choix de site exempt d'activités volcaniques.

Evénements climatiques d'ampleur exceptionnelle

Des simulations complémentaires sur les évolutions climatiques globales permettront de consolider les simulations déjà réalisées dans le cadre du Dossier 2005. Elles permettront notamment de mieux appréhender le choix des exutoires à 1Ma et le choix des biosphères types à considérer.

4.4.10 Synthèse

Dans la section précédente, les options retenues permettent de s'affranchir d'incertitude ou du moins d'en réduire les effets. Les fonctions de sûreté reposent sur les caractéristiques intrinsèques des composants, l'analyse phénoménologique indique les incertitudes qui subsistent.

L'analyse n'est pas conduite par composant mais selon les grands phénomènes ou incertitudes à maîtriser, il s agit :

- du comportement hydraulique du stockage (architecture d'ensemble, nombre de scellements),
- du comportement mécanique, hydro-mécanique et thermo-hydro-mécanique des argilites (EDZ), en liaison avec les dimensions et orientation des ouvrages,
- du taux de vide : conformément au guide de sûreté, il est nécessaire de minimiser les vides (influence sur l'EDZ),
- du comportement des radionucléides en température (renvoyant à l'adoption d'un surconteneur),
- du comportement des argilites et des matériaux en température (critère thermique),
- du relâchement d'espèces complexantes ou perturbatrices par les colis primaires MAVL (séparation des colis et des alvéoles, distance de garde et scellements efficaces),

- de la transposition des données acquises au Laboratoire Souterrain (implantation au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien),
- de la gestion des gaz qui renvoie notamment à la conception des alvéoles HA et MAVL.

La confiance dans la connaissance des propriétés de la roche avec peu d'incertitudes a été renforcée grâce aux résultats du programme de reconnaissance 2007-2009 sur la zone de transposition et grâce aux résultats des expérimentations menées dans le laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne. Le choix de ZIRA en 2009 permet de préciser le contour du scénario d'évolution normale et de réexaminer les modalités de gestion de certaines incertitudes liées au positionnement du stockage dans la zone de transposition. Les gammes de valeurs des caractéristiques intrinsèques de la formation hôte sont précisées et sont intégrées dans le scénario d'évolution normale.

La démarche revisitée pour le choix et la description des biosphères à retenir pour les évaluations permettra de préciser les hypothèses retenues pour définir les groupes de références hypothétiques, leur classe d'âge, leurs activités et leurs habitudes alimentaires. Cette démarche permet également de cerner le type de biosphère à considérer en regard des évolutions climatiques globales sur 1 million d'années.

Il ressort des évolutions de conception :

- des alvéoles de déchets HA, que les incertitudes liées à l'éventuel retrait du chemisage sont levées. Les incertitudes résiduelles sont liées aux perturbations chimiques et sur le rôle des produits de corrosion sur le transfert des radionucléides. Elles sont gérées par des hypothèses de scénarios. Des connaissances complémentaires sont en cours pour appréhender l'ensemble des processus se produisant avec cette nouvelle interface, notamment en laboratoire souterrain,
- des alvéoles de déchets MAVL, qu'une augmentation potentielle des taux de vide requiert des études complémentaires pour mieux appréhender l'évolution de la zone endommagée à leur contact.

Les progrès accomplis depuis 2005 permettent de mieux appréhender les couplages hydro-thermo-mécaniques mais il persiste encore des incertitudes sur les processus régissant l'évolution du stockage. Des études en laboratoire, des essais dans le laboratoire souterrain et des démonstrateurs sont en cours. Ils permettront de conforter les connaissances et de réduire les incertitudes résiduelles. En l'attente de ces résultats les modalités de gestion retenues dans le Dossier 2005 sont pour la plupart reconduites mais les valeurs nominales de certains paramètres seront revisitées pour la DAC.

Des incertitudes technologiques subsistent également. Des démonstrateurs sont en cours de construction pour conforter les solutions proposées, notamment pour les remblais, et la pose de scellements.

4.4.11 Perspectives pour réduire les incertitudes résiduelles

L'analyse conduite en 2009 correspond à une étape importante d'acquisition de données, mais nombre d'expérimentations, tests, essais et mesures sont encore en cours d'acquisition. Des axes de progrès s'appuient notamment sur des acquisitions de données au Laboratoire souterrain (Andra, 2009g) :

- Les propriétés de la roche sont désormais bien connues grâce à un important programme de caractérisation en forage et dans le laboratoire. L'acquisition de données sur le Callovo-Oxfordien in situ dans le laboratoire de Meuse / Haute-Marne sur des durées plus longues permettront de conforter les données existantes (perméabilité, diffusion, rétention).
- La caractérisation des propriétés de transport de la zone endommagée, immédiatement après creusement, puis leur évolution sous l'effet des contraintes mécaniques, seront poursuivies.
- Des études seront poursuivies sur les conditions dans lesquelles se déroule la corrosion au sein du stockage, notamment pour évaluer plus précisément la montée en pression des gaz de corrosion et l'influence de ces conditions sur le transitoire hydraulique autour des ouvrages de stockage. Ces études s'appuieront sur des expérimentations in situ sur des matériaux métalliques dans des conditions aussi proches que possibles de celles du stockage.

- L'évaluation de la durée de présence de l'oxygène dans les ouvrages et ses conséquences sera étudiée. Le schéma d'évolution globale des transferts de fluide dans le stockage doit être précisé par une meilleure connaissance des différentes voies de migration de l'hydrogène.
- La poursuite, pour les déchets vitrifiés (hors C0), des études sur le passage d'un modèle de dissolution uniquement piloté par la vitesse initiale, vers un modèle de type « V_0.S → Vr » qui apporte un gain appréciable et quantifiable en termes de réduction et de décalage dans le temps de l'impact. La compréhension plus fine des mécanismes sous-jacents, apporterait une plus grande robustesse à l'analyse de sûreté ; elle nécessite l'acquisition de données in situ dans des conditions d'environnement proches de celles du stockage.
- La poursuite des études sur la chimie des eaux.
- Des études pour réduire les incertitudes identifiées par l'analyse phénoménologique des situations de stockage ; elles nécessitent la description détaillée des interfaces entre composants ouvragés la formation géologique ainsi que le suivi de leur évolution dans le temps.
- Des études sur le dimensionnement du revêtement des ouvrages et des caractéristiques mécaniques des remblais de galerie sur l'endommagement de l'argilite en paroi d'ouvrage.
- Des études en lien avec la conception de l'interface du chemisage-argilite en tête d'alvéole HA vis à vis du comportement de l'alvéole fermée.
- Poursuivre les investigations sur la ZIRA ce qui permettra de consolider les acquis de connaissances sur les caractéristiques du Callovo-Oxfordien dans cette zone.

4.4.12 Observations et surveillance après la phase de fermeture

En cohérence avec le guide de sûreté un programme d'observation et de surveillance du site est à envisager pendant les phases de construction et d'exploitation, notamment pour suivre l'évolution de certains phénomènes et/ou paramètres pour la sûreté après fermeture.

Pour la phase après fermeture, tous les ouvrages de liaison surface fond sont fermés et scellés, le stockage est conçu pour assurer la sûreté de manière passive à long terme, conformément au Guide de sûreté « *Après fermeture de l'installation de stockage, 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* » (cf. Chapitre 1).

Un programme d'observation et de surveillance est ainsi mis en place pendant la phase d'exploitation. Les dispositifs mis en place ne doivent pas perturber le système.

En cohérence avec le guide de sûreté et les fonctions et exigences de sûreté définis en section 1.2, le programme d'observation et surveillance prévoit pendant la phase d'exploitation de :

- suivre l'évolution temporelle des propriétés hydrauliques de la zone endommagée,
- suivre l'évolution des interactions chimiques des matériaux ouvragés, notamment par la mesure de pH, Eh,
- vérifier les taux de vide résiduels dans les ouvrages à la fermeture, notamment vis à vis l'évolution de la zone endommagée après fermeture,
- surveiller les conditions favorables à la faible dégradation des ouvrages de stockages,
- surveiller l'évolution thermique de la formation hôte,
- surveiller la présence ou l'absence d'eau liquide et l'humidité relative dans les alvéoles (HA et MAVL),
- suivre les phénomènes de corrosion dans les alvéoles de déchets HA.

Un certain nombre de paramètres seront ainsi suivis pour répondre à ces objectifs, il s'agira du comportement différé de la roche, de l'évolution du diamètre interne des ouvrages, de l'évolution des « THMC » des ouvrages en béton. Des dispositifs particuliers sont également envisagés pour suivre l'évolution d'une alvéole de déchets HA vitrifiés, évolution THMC de l'alvéole mais également de l'étanchéité du surconteneur.

Parmi les dispositifs techniques à mettre en œuvre pour cette surveillance, des techniques de transmission sans fils sont à l'étude.

La surveillance comprend également l'observation et la surveillance de la biosphère au droit de la ZIRA, des ZIIS et de leurs environnements dans la zone de transposition.

4.5 Scénarios

La performance du stockage après sa fermeture est évaluée sur la base de l'évaluation quantitative de deux grandes catégories de scénarios : le scénario d'évolution normale (SEN) et les scénarios d'évolution altérée (SEA).

- ***Le scénario d'évolution normale***

Le scénario d'évolution normale (SEN) constitue une représentation «enveloppe» de l'ensemble des phénomènes considérés comme certains ou suffisamment probables ou reflétant un comportement du stockage conforme à ce qui est attendu par ses concepteurs. Tous les phénomènes ne sont pas nécessairement représentés, ils ne sont pas ignorés, mais simplifiés.

Le modèle de sûreté inclut la représentation du stockage dans l'espace, et dans le temps : représentation des déchets en tenant compte de leurs modèles de relâchement, représentation des ouvrages, représentation de la migration des radionucléides dans les alvéoles de stockage, dans les galeries, puits ou descenderies, dans les argilites du Callovo-Oxfordien, dans les formations encaissantes, ainsi que les exutoires et la biosphère.

L'objectif du SEN est d'évaluer la performance globale du stockage vis-à-vis de l'objectif de protection de l'homme et de l'environnement, en tirant le parti de l'ensemble des acquis phénoménologiques du programme de recherche HA-MAVL. Il s'agit donc bien de faire reposer le SEN sur la phénoménologie la plus vraisemblable et sur les événements dont l'occurrence peut être qualifiée de certaine ou probable. Le scénario ainsi défini n'est pas une prédiction de ce qui adviendra compte tenu des incertitudes et des échelles de temps en jeu.

Le SEN répond en effet à plusieurs objectifs distincts. Il a pour but avant tout de vérifier que le stockage, tel qu'il a été conçu et telle que son évolution dans le temps est comprise par la connaissance scientifique actuelle, répond aux objectifs de sûreté qui lui ont été assignés. Cet objectif général se décline en plusieurs objectifs complémentaires :

- vérifier que les performances atteintes, telles qu'elles apparaissent au travers des indicateurs, sont en accord avec les valeurs seuils fixées au préalable. Cet objectif de sûreté implique de présenter une vision majorant l'impact potentiel d'un stockage,
- présenter une simulation d'ensemble de l'évolution du stockage, afin d'évaluer globalement le comportement attendu, sous forme d'une représentation nécessairement simplifiée et en partie conventionnelle, mais tendant néanmoins à être la plus représentative possible. Il s'agit d'évaluer l'importance relative des phénomènes majeurs, les performances des fonctions de sûreté. Cet objectif de compréhension impose de ne pas retenir de représentations trop simplificatrices, qui nuiraient à la représentativité des modèles,
- apporter les éléments pour juger de la sensibilité de la sûreté aux variations de l'environnement et du comportement des composants du stockage, et donc quantifier la robustesse du stockage à travers des analyses de sensibilité.

- ***Les scénarios d'évolution altérée***

Les scénarios d'évolution altérée permettent de couvrir les incertitudes sur le fonctionnement du stockage après fermeture. Ils correspondent à des situations hypothétiques, et permettent de couvrir les incertitudes de connaissance du stockage et d'explorer des situations peu probables.

Ces scénarios sont de natures diverses (événements extérieurs au stockage, erreur de conception ou défaut de réalisation de composants, par exemple le scellement, processus se déroulant d'une manière non anticipée…) mais qui peuvent se rattacher au nombre limité de scénarios suivants (Figure 4.5-1) :

- un scénario « défaut de colis », qui teste la robustesse du système vis-à-vis de la défaillance de tout ou partie des surconteneurs des colis de stockage HA,

- un scénario « défaut de scellements », qui teste la robustesse du système consécutive à un court-circuit d'une partie ou de la totalité des différents scellements du stockage,
- des scénarios d'intrusion humaine involontaire (impliquant différents « forages ») dès 500 ans (cf. guide ASN 2008) qui envisagent :
  - ✓ la manipulation de carottes extraites d'un sondage de reconnaissance ayant traversé le stockage ; l'impact radiologique est immédiat et calculé par des moyens identiques à ceux utilisés en phase d'exploitation,
  - ✓ la possibilité de forages d'exploitation de l'eau des aquifères sus-jacents ou d'un ou plusieurs forages de reconnaissance abandonnés et mal scellés traversant le stockage,
- un scénario « fonctionnement très dégradé » correspondant à un cas « limite » de fonctionnement du stockage, jugé peu vraisemblable mais permettant de tester la robustesse du stockage.

4.5.1 Scénarios du Dossier 2005

Le Dossier 2005 a traité les scénarios listés ci-avant, leur définition étant basée sur une description des options de conceptions et sur l'état des connaissances techniques et scientifiques à ce stade.

La définition des concepts de stockage s'est effectuée à la profondeur du laboratoire de Meuse / Haute-Marne, là où le plus grand nombre de données étaient accessibles et validées. Afin que les conclusions restent valables à l'échelle de la zone de transposition, les performances du système de stockage ont été évaluées dans des conditions défavorables au regard du positionnement en particulier :

- l'épaisseur de la couche d'argilites – dont dépend la performance de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » et,
- le comportement géomécanique de la roche, qui influe notamment sur la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » au travers de l'endommagement en paroi d'ouvrages.

Dans le premier cas, la performance de la fonction est d'autant plus faible que l'épaisseur de la couche est faible. Dans l'autre, la zone endommagée est plus étendue quand le stockage est implanté plus profondément.

La localisation du stockage était envisagée sur toute la zone de transposition, c'est-à-dire 250 km^2. Aussi, dans le cadre d'une approche conservative, il a été retenu de considérer à la fois l'épaisseur de formation hôte minimale et la profondeur maximale d'implantation, bien que ces deux situations ne se réalisent pas aux mêmes endroits dans la zone de transposition (l'épaisseur minimale se situe à l'emplacement du laboratoire de Meuse / Haute-Marne, la profondeur maximale se situe plus à l'ouest dans le second).

Le SEN et les SEA ont fait l'objet de plusieurs études de sensibilité destinées à couvrir les incertitudes sur les paramètres ou modèles envisagés dans le calcul du SEN.

• Quatre SEA dont les modèles de calcul se fondent sur ceux du SEN, en modifiant les paramètres / modèles en fonction de la situation à représenter.

• Trois SEA pour évaluer successivement la défaillance d'une des trois fonctions de sûreté :

Le scénario « défaut de scellements »

Le scénario « défaut de colis »

Le scénario « forage »

• Un scénario « fonctionnement très dégradé » permettant de prendre en compte une dégradation généralisée des trois fonctions de sûreté.

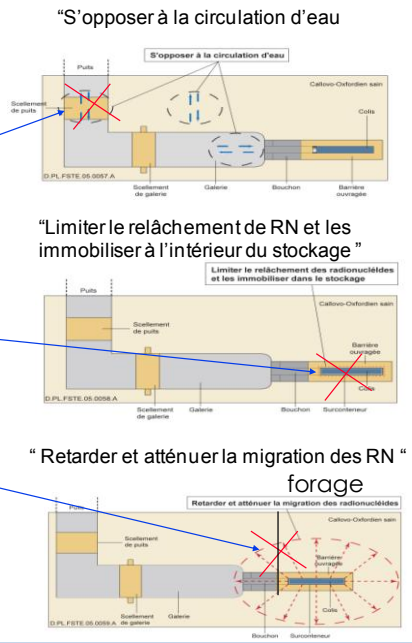


Figure 4.5-1 Schéma représentant le lien entre fonctions de sûreté et scénarios d'évolution altérée (figure à revoir)

Les résultats du traitement des scénarios du Dossier 2005 ont permis :

- une évaluation de l'impact dans des conditions majorantes (des données favorables ont été négligées),
- une vérification que les performances attribuées aux différents composants du stockage permettent d'assurer la sûreté, en se basant sur des indicateurs appropriés,
- une compréhension du fonctionnement du stockage, en particulier, du régime de transfert des radionucléides,
- une évaluation de la robustesse du système face à des situations induisant la défaillance des fonctions attribuées aux principaux composants du système.

4.5.2 Scénarios pris en compte pour l'étude des évolutions de conception entre 2005 et 2009

L'évolution de conception, les acquis de connaissances depuis 2005 sur la zone de transposition et l'analyse des incertitudes associées conduisent à réexaminer certains scénarios, revoir certaines hypothèses ou valeurs nominales des paramètres qui avaient été pris en 2005.

Celles-ci concernent essentiellement :

- la présence d'une descenderie déroulée à la place d'un puits vertical,
- un nouveau positionnement des puits d'accès, relativement aux zones de stockage,
- la présence d'un puits de retour d'air à proximité de la zone de stockage de déchets MAVL,
- un positionnement du stockage en cohérence avec le choix de ZIRA,
- des valeurs de perméabilité, porosité, et gradient hydraulique précisées grâce au programme de reconnaissance ; elles sont également à considérer en regard de la position de la ZIRA.

Le scénario d'évolution normale est utilisé pour intégrer les nouvelles valeurs obtenues par le programme de reconnaissance sur la zone de transposition (section suivante). L'objectif est de conforter la performance du Callovo-Oxfordien vis-à-vis de ses fonctions de sûreté « s'opposer à la circulation d'eau », et « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». Seules les hypothèses relatives à la formation hôte ont été modifiées par rapport au Dossier 2005.

Le scénario défaut de scellement est choisi pour l'étude des nouvelles options de conception. Il permet en effet d'apprécier l'influence des dispositions considérées sur le régime hydraulique qui se met en place (influence d'un gradient hydraulique horizontal, effet de circulation en U). Ce scénario intègre par ailleurs les évolutions relatives aux dispositifs de scellements des options de conception de 2009.

4.5.2.1 Scénario d'évolution normale pour les évaluations de 2009

Pour les évaluations effectuées au stade de 2009, l'avancement du projet vers le choix d'une ZIRA géographiquement plus restreinte et les connaissances acquises permettent de préciser certains paramètres. Les acquis du programme de reconnaissance consolident l'homogénéité latérale de la formation et une épaisseur de couche qui varie de manière régulière du sud vers le nord est, de 130 à 160 m ce qui permet de préserver une épaisseur de garde minimale de 60 m de part et d'autre du stockage. Par exemple, les valeurs de perméabilité sont consolidées et permettent de disposer de profils de variation de la perméabilité verticale à l'échelle de la zone de transposition. Le positionnement de la ZIRA conduit à une épaisseur a minima de 140 m et un gradient hydraulique vertical à l'actuel d'au plus 0,2 m/m.

Pour les études des options de conception de 2009, les études couvrent les gammes de valeurs obtenues sur les 5 plateformes de forages dans la zone de transposition pour les caractéristiques du Callovo-Oxfordien.

Tableau 4.5-1 Liste des études de sensibilités aux paramètres du Callovo-Oxfordien

Paramètre ou phénomènes	Etudes 2009
Perméabilité du Callovo-Oxfordien	Etudes de 3 profils de perméabilité sur la zone de transposition
Paramètres de transfert et de rétention diffusion, porosité accessible à la diffusion	Valeurs nominales de coefficient de diffusion et porosité accessible à la diffusion selon les plateformes de forage de reconnaissance de la zone de transposition
Epaisseur du Callovo-Oxfordien	Etudes sur 5 positions dans la zone de transposition. Epaisseur prise sur la ZIRA : 140 m

Les calculs présentés dans la section 4.6 confirment que les paramètres évoluent bien dans les limites considérées dans le Dossier 2005 et donnent des résultats d'ensemble au moins aussi bons qu'en 2005 pour les indicateurs considérés.

4.5.2.2 Scénario « défaut de scellements » pour 2009

Le scénario « défaut de scellements » traite les combinaisons de défaillances des scellements du stockage (puits, descenderie, galeries et fractionnement de modules) et des bouchons d'alvéoles. Une situation où le stockage est abandonné sans que le puits soit fermé est également traitée. Ce scénario inclut le développement d'une zone endommagée autour des ouvrages constituant une voie de transfert potentielle des radionucléides.

L'analyse qualitative de sûreté du Dossier 2005 avait montré que le scénario « défaut de scellements » avait vocation à couvrir différents types de situations :

- un court-circuit partiel de la formation hôte, dû soit à un mauvais contact roche-argile gonflante, soit à une extension excessive de l'EDZ, soit encore à une évolution non anticipée des propriétés de celle-ci (sous l'effet d'une combinaison d'incertitudes par exemple). Les radionucléides peuvent alors transiter préférentiellement par les galeries puis les puits vers la surface selon un mode de transport plus rapide (plus convectif et non seulement diffusif),
- dans certaines situations, une modification des conditions d'environnement hydro-chimique au sein des alvéoles susceptible d'induire un relâchement plus précoce (en dehors des plages de valeurs dans lesquelles les composants sont susceptibles de remplir au mieux leurs fonctions de sûreté), ce qui induit également une défaillance partielle de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »,
- dans certaines situations très peu probables, une dégradation d'ensemble de la perméabilité des scellements.

Les hypothèses du SEA « défaut de scellement » du dossier 2005 couvraient de manière enveloppe l'ensemble des incertitudes :

- soit par le défaut de contact entre la roche et la bentonite équivalant du point de vue du calcul (en perméabilité équivalente) à un sur-endommagement,
- soit par la sensibilité envisageant une dégradation de la perméabilité du noyau. Dans cette même étude, on représente un endommagement possible des noyaux de scellement en dégradant leur perméabilité d'ensemble.

Cette approche a conduit à représenter « en situation de défaut de scellement », une zone fracturée le long du scellement de puits et une zone fracturée le long des scellements de galerie bien que des coupures hydrauliques soient interposées dans l'EDZ. L'approche a conduit à également étudier en sensibilité une situation où les propriétés de transport hydrauliques et géochimiques de cette zone fracturée et de la zone microfissurée sont dégradées vers des valeurs plus défavorables qu'en référence, cette situation très peu probable considère des combinaisons d'incertitudes c'est-à-dire qu'une incertitude amplifie les effets d'une autre incertitude.

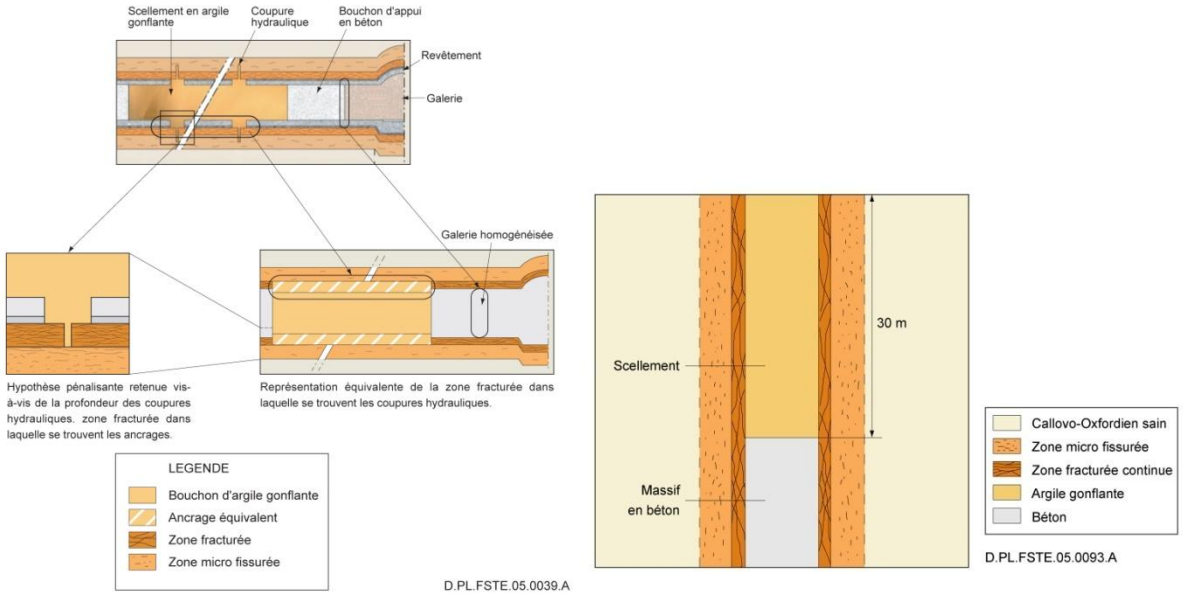


Figure 4.5-2 *Représentation schématique du défaut de scellement de puits (à droite) et du défaut de scellement de galerie (à gauche).*

Les résultats des quantifications menées pour le Dossier 2005 sur ces situations de défaut de scellements avaient montré que :

- quelles que soient les situations de défaillance de scellements étudiées, l'impact associé à la fraction d'activité qui migre par les ouvrages est négligeable devant celle qui diffuse au travers de la formation hôte. La dose à l'exutoire n'est pas modifiée ; l'impact n'apparaît pas supérieur à celui du SEN,
- la sûreté ne dépend pas d'un composant unique dont la défaillance serait ainsi particulièrement préjudiciable. Cela conforte la démarche d'ensemble en montrant combien les différents éléments du stockage se combinent et se « relaient », le cas échéant, pour assurer la robustesse d'ensemble du système.

La représentation des scénarios d'évolution altérée se fonde sur les hypothèses du SEN en modifiant les paramètres / modèles en fonction de la situation à représenter. Le jalon 2009 correspond à la proposition d'une ZIRA dans laquelle une représentation étendue du stockage est envisagée. Cette représentation est donc à prendre en compte pour le scénario défaut de scellement.

L'évolution de conception introduit trois ouvrages de scellements supplémentaires : le scellement de puits de retour d'air (RA) de la zone MAVL, le scellement de descenderie, et le scellement de galerie de retour d'air des alvéoles MAVL. Les évolutions de conception ont également conduit au maintien du

chemisage en tête d'alvéole HA. L'analyse de ces éléments conçus de manière similaire aux scellements décrits dans le Dossier 2005, renvoie aux conclusions du Dossier 2005. L'analyse inclut :

- l'implantation de puits de retour d'air dont le scellement est de conception similaire aux scellements de puits ne conduit pas à considérer de nouvelles incertitudes de conception ou d'évolution phénoménologiques par rapport à celles d'un scellement de puits. La différence majeure entre les puits de service et les puits de retour d'air est liée à la taille de l'ouvrage, les puits de retour d'air sont conçus avec un diamètre inférieur et donc avec une EDZ associée de plus faible extension,
- les scellements de galerie de retour d'air des alvéoles MAVL sont de conception similaire à celle des scellements d'alvéole MAVL. La différence majeure entre le scellement en tête d'alvéole et le scellement de galerie de retour d'air tient à la taille de l'ouvrage, la galerie de retour d'air est conçue avec un diamètre inférieur et donc avec une EDZ associée de plus faible extension,
- le scellement de descenderie est positionné à la base de l'ouvrage, dans le Callovo-Oxfordien au même niveau d'implantation que le stockage. Le scellement est de conception similaire à celui des galeries de liaison, y compris l'orientation de l'ouvrage qui sera parallèle, si nécessaire, à sigmaH,
- l'évolution de conception des alvéoles de déchets HA qui prévoit le maintien du chemisage en tête d'alvéole. La représentation du bouchon en tête d'alvéole comprend une interface où sont présents des produits de corrosion et où se dérouleront des interactions fer-argile. Elle devra être représentée avec ses propriétés hydrauliques à déterminer. En l'attente de la description de son évolution phénoménologique à long terme, compte tenu des incertitudes sur l'extension des perturbations chimiques, il est proposé à titre conventionnel de considérer un SEA « défaut de bouchon » qui couvre les incertitudes sur les interfaces argilite/chemisage métallique/bentonite. Les hypothèses du SEA défaut de bouchon dans le cadre de la situation tous scellements défaillants du Dossier 2005 couvrent ces incertitudes (i.e. un défaut de contact entre la roche et la bentonite, par la sensibilité envisageant une dégradation de la perméabilité du noyau).

L'analyse a ainsi examiné l'incidence de ces ouvrages sur les situations qui seraient à traiter dans le cadre d'un scénario défaut de scellement. Si ces composants n'apportent pas d'incertitudes nouvelles quant à leur conception, en revanche ils sont susceptibles d'influencer le comportement hydraulique du stockage, en particulier, par leur implantation dégroupée. En effet, l'accroissement des distances entre les ouvrages d'accès impose de prendre en considération le gradient hydraulique horizontal qui pourrait éventuellement s'exprimer dans certains ouvrages en fonction de leur orientation et de leur disposition relative.

- ***Cas de calcul : défaillance de tous les scellements***

Cette situation nécessite de traiter l'ensemble des zones de stockage ; elle couvre la défaillance de tous les ouvrages de scellements depuis les bouchons d'alvéoles jusqu'aux puits d'accès. Elle conduit à considérer l'existence d'une zone fracturée continue depuis les colis de déchets jusqu'aux encaissants. Ce type de situation peut couvrir, par exemple, une évolution non anticipée de la zone endommagée, quelle qu'en soit l'origine.

L'analyse quantitative des dispositions de conception a donc été réalisée en considérant le scénario tous scellement défaillants car il permet de discriminer au mieux l'influence des évolutions de conception depuis 2005 (section 4.6).

Tableau 4.5-2 *SEA défaut de scellements - Tableau résumant la liste des cas de calculs traités dans le Dossier 2005 (en normal). En gras, les scellements liés aux évolutions de conception (puits de retour d'air et descenderie).*

	SEN	Scellements de puits défaillants	Scellements de galeries défaillants	Tous scellements défaillants
Bouchons d'alvéoles HA	Défaillance isolée[46]	Défaillance isolée	Défaillance isolée	Défaillance des bouchons d'alvéoles de déchets HA
Scellements de puits d'accès	Efficaces	Défaillants	Efficaces	Défaillants
Scellements de puits de retour d'air	**Efficaces**	**Défaillants**	**Efficaces**	**Défaillants**
Scellements de descenderie	**Efficaces**	**Efficaces**	**Défaillants**	**Défaillants**
Scellements de modules HA, et de galeries principales et secondaires	Efficaces	Efficaces	Défaillants	Défaillants
Scellements d'alvéoles MAVL (entrée et retour d'air)	Efficaces	Efficaces	Défaillants	Défaillants

4.5.3 Scénarios à prendre en compte pour la DAC 2014

L'ensemble des scénarios présentés ci-avant seront revisités d'ici la DAC. Leur définition sera précisée au regard des nouvelles données en cours d'acquisition et de la description des installations qui sera détaillée d'ici la DAC.

Ce sont notamment :

- les avancées de connaissance acquises par mesures et observations en laboratoire souterrain, notamment sur la zone endommagée, ses caractéristiques et son évolution,
- le choix de la ZIRA qui conduit à un positionnement du stockage en tenant compte des ses caractéristiques intrinsèques d'épaisseur, perméabilité, gradient hydraulique,
- l'évolution de la modélisation qui conduit à représenter plus finement le stockage. Pour ce faire, depuis 2005, un effort conséquent sur le maillage du modèle a été réalisé pour représenter plus finement chacune des parties du stockage depuis l'alvéole jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien. La finesse du maillage a ainsi permis l'évaluation de la performance des nouvelles options de conception notamment relatives aux puits, à la descenderie, aux alvéoles, et aux modules de 2009,
- le référentiel de connaissance et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité à vie longue (Andra, 2009d).

Les scénarios sont présentés ci-après. Les paragraphes suivants n'ont pas pour objet de décrire de manière très détaillée l'ensemble des modèles et paramètres retenus dans le scénario d'évolution normale, mais de préciser à un niveau très général, au regard des évolutions de conception et des données acquises, les phénomènes ou les incertitudes phénoménologiques dont on anticipe que leur représentation pourrait évoluer dans le scénario d'évolution normale par rapport aux choix qui avaient été faits dans le Dossier 2005.

4.5.3.1 Scénario d'évolution normale (SEN)

La description du SEN sera revue pour prendre en compte :

- la localisation du stockage dans la ZIRA,
- l'implantation en vertical des ouvrages de stockage dans la zone d'argilosité maximale au sein de laquelle se situe le milieu géométrique de la couche. L'épaisseur de formation hôte est *a minima* de 140 m dans la ZIRA ce qui permet de disposer sur cette zone d'une épaisseur minimale de garde de Callovo-Oxfordien de 60 m, voire plus,
- la profondeur (< 600 m), ce qui conduira à retenir l'épaisseur de zone endommagée associée et donc à une extension moindre,

[46] On rappelle que la défaillance isolée est traitée en considérant un bouchon d'alvéole HA défaillant. Les calculs ont montré que cela est sans incidence en scénario d'évolution normale.

- l'implantation centrée des puits, l'implantation de la descenderie double tube et l'organisation des zones de stockage seront revisités au regard des choix de ZIIS,
- la démarche de choix et description des biosphères telle que décrite en chapitre 1 sera appliquée,
- la représentation étendue du stockage.

Dans le cadre du Dossier 2005, l'implantation du stockage n'était pas géographiquement définie dans la zone de transposition (positionnement en XY). Une localisation « par défaut », conventionnelle, correspondant au site du laboratoire de Meuse/Haute-Marne a été retenue en référence. Compte tenu de l'indépendance phénoménologique des zones de stockage, par conception, chacune d'entre elles a été supposée se trouver à l'emplacement du laboratoire pour la réalisation des calculs de sûreté. La distance aux exutoires était ainsi la même pour chacune des zones.

La finesse du maillage permettra une représentation plus fine des composants et permettra de rendre compte de manière plus réaliste du transfert des radionucléides et de l'impact aux exutoires des radionucléides (exutoires concernés, trajectoires des radionucléides issus des différentes sous-zones et leur influence respective). En prenant en compte la ZIRA, une représentation étendue du stockage est ainsi envisagée.

- la représentation plus fine de l'ensemble des composants du stockage.

Une fois les options de conception figées, leur description sera intégrée.

- la prise en compte des avancées de connaissances.

Elles seront fondées sur la consolidation des données acquises au sein du laboratoire de Meuse Haute-Marne, et de celles qui seront conduites sur la ZIRA après 2009. Les valeurs nominales des paramètres à retenir pour le calcul de référence seront revisitées au regard de ces acquis.

Par ailleurs la stratégie de choix pour des valeurs pour le modèle de calcul de sûreté restera dans la continuité de celle du Dossier 2005 et du présent document.

Le scénario couvre plusieurs cas de calculs, respectivement :

- un « calcul de référence » qui présente l'état des connaissances de l'Andra sur l'évolution prévisible du stockage, dans une approche qui prend en compte à la fois les acquis de la recherche et l'approche de sûreté. Il a pour objectif d'évaluer un majorant de l'impact d'une éventuelle installation de stockage. Pour cela, il se compose d'un ensemble de paramètres et de modèles dont la logique de sélection est de retenir ceux qui s'appuient sur la meilleure connaissance scientifique disponible, en ajoutant un degré de conservatisme variable en fonction des incertitudes : faible là où les paramètres et modèles ont fait l'objet de validations détaillées, fort là où il subsiste encore des interrogations importantes,
- des calculs de sensibilité, mono ou multi-paramétriques, destinées à hiérarchiser les paramètres et les modèles, en déterminant ceux dont la variation induit le plus de conséquences sur l'évaluation globale.

4.5.3.2 Scénario défaut de scellement

Les situations présentées au paragraphe précédent constitueront la base du scénario défaut de scellement pour la DAC. Elles intègreront en effet l'ensemble des scellements à représenter.

Le défaut de scellement reposant cependant sur le SEN, une représentation étendue, tenant compte des choix de ZIRA et ZIIS est envisagée.

Néanmoins, l'analyse des résultats montre que les avancées de connaissance peuvent conduire à une représentation différente du défaut de scellement :

- soit sur l'EDZ (extension et valeurs des paramètres) : si les phénomènes de cicatrisation sont validés, cela pourrait conduire à des valeurs de perméabilité moins élevées que celles retenues dans le cadre du Dossier 2005,
- soit sur la technologie de mise en place des scellements. L'expérience Key conduite au laboratoire souterrain a montré l'efficacité hydraulique d'une saignée recoupant la zone fracturée. Il reste néanmoins des incertitudes sur le comportement différé de l'argilite en paroi des saignées. Les

essais en laboratoire souterrain doivent se poursuivre notamment par la mise en œuvre d'un test de performance d'un scellement en galerie,
- soit par le développement de pistes de progrès qui pourraient par exemple permettre la dépose du soutènement en béton ce qui favoriserait un bon contact entre le noyau argileux et l'argilite. Des essais seront menés en laboratoire souterrain.

Pour la DAC, l'analyse phénoménologique des situations de stockage de 2005 sera revisitée tenant compte de l'implantation prévue pour les ouvrages de liaisons et l'architecture fond dans la ZIRA, des acquis de connaissance et des essais notamment menés en laboratoire souterrain. La mise à jour des modèles conceptuels intégrera une compréhension phénoménologique plus fine et les résultats des expérimentations en laboratoire souterrain permettront de revisiter la représentation du défaut de scellement, en particulier, le défaut de scellement de puits.

4.5.3.3 Scénario « défaut de colis »

Le scénario «défaut de colis» se ramène à une défaillance de surconteneur HA. Il considère des défauts de conteneurs d'origines diverses (corrosion accélérée, défaut de fabrication…) représentés comme une perte conventionnelle totale de l'étanchéité du surconteneur, 100 ans après sa mise en alvéole.

La prise en compte de colis défaillants induit un relâchement et une migration de radionucléides dans un milieu à forte charge thermique et fort gradient de température. L'effet de la thermique sur les modèles et les paramètres de relâchement et de transport est pris en compte pour l'ensemble des composants.

Les situations de défaillances initiales en lien avec des problèmes de contrôle qualité au niveau des surconteneurs de déchets HA réalisés en grand nombre sont considérées en SEN.

Le cas des défaillances initiales sera réexaminé, notamment en lien avec les résultats des analyses de risques détaillées en exploitation pouvant conduire à un défaut de colis. Le choix de traiter de manière conventionnelle une défaillance isolée pourra être reconduit et les hypothèses de défaillances de colis plus drastiques du Dossier 2005 feront l'objet d'une nouvelle analyse en vue de la DAC.

Le scénario défaut de colis diffère du SEN par une fraction de l'inventaire plus importante libérée dès les premières centaines d'années.

Deux cas seront traités.

- le premier, qui correspond par exemple à une situation de défaillance du système de contrôle qualité, revient à envisager un mois de fabrication de conteneurs défectueux,
- le deuxième cas, traité en sensibilité, prend en compte une défaillance complète de l'ensemble de l'inventaire des conteneurs de déchets vitrifiés et des combustibles usés. Il correspond, par exemple, à une mauvaise appréciation de la durée de vie des conteneurs sur l'ensemble du stockage. En ce sens, supposer un défaut au bout de 100 ans après la mise en alvéole est une hypothèse maximaliste pour ce qui concerne les colis HA.

La défaillance prématurée des enveloppes de déchets HA affecte deux des trois fonctions de sûreté :

- d'une part, la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » dans la mesure où l'arrivée d'eau sur les déchets pendant le transitoire thermique peut être préjudiciable vis-à-vis de la cinétique de relâchement,
- d'autre part, sur la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». En effet, dans la mesure où les paramètres de transport ou de rétention des radionucléides dans un environnement à forte charge thermique et fort gradient de température sont moins favorables et/ou moins bien appréhendés, les paramètres retenus durant le transitoire thermique sont plus défavorables que ceux retenus à long terme pour la diffusion ainsi que la sorption de certains éléments.

La conception prévoit en référence un chemisage en acier non allié qui doit assurer une fonction de stabilité mécanique de l'alvéole et une fonction d'étanchéité pour la période de réversibilité.

Le maintien du chemisage en tête d'alvéole ainsi que l'étanchéité du chemisage pendant la période de réversibilité, conduisent à revoir les conditions d'environnement dans l'alvéole. La garantie absolue de l'étanchéité du chemisage d'un point de vue technologique n'est pas encore validée. Un défaut d'étanchéité initial du chemisage ne peut être exclu à ce stade des études et ne remet pas en cause les options de sûreté du présent document.

Dans ces conditions, le scénario « défaut de colis » serait à examiner en regard d'un « défaut d'étanchéité du chemisage » ce qui pourrait être assimilé à une double défaillance. En vue de la DAC, une analyse plus approfondie des hypothèses à retenir sera menée, ainsi qu'une analyse de défaillances de ces composants ouvragés.

4.5.3.4 Scénario « forages »

Dans le cadre du scénario « forages », lié à une éventuelle intrusion humaine, la position adoptée dans le Dossier 2005 était de retenir deux types de situations:

- des situations qui découlent de la remontée de carottes, débris ou cuttings de déchets par forage. Pour ces situations l'impact radiologique est immédiat,
- des situations résultant de l'abandon d'un ou plusieurs forages. Le scénario « forage(s) » envisage dans ce cas diverses situations d'intrusion humaine involontaire par un ou plusieurs forage(s) au travers du stockage.

La date d'occurrence du scénario à 500 ans sera reconduite a priori. L'évolution de l'architecture générale du stockage conduit à revoir les situations à considérer. L'hypothèse conventionnelle peu vraisemblable d'un forage pérenne semble pertinente à reconduire. Néanmoins, la localisation des forages sera à reconsidérer a minima :

- en regard de l'allongement des alvéoles de déchets MAVL,
- en regard des galeries de retour d'air des zones de stockage de déchets MAVL,
- à proximité des alvéoles de déchets HA (où le chemisage en tête d'alvéole est maintenu).

Des situations qui découlent de la remontée de carottes seront également examinées.

4.5.3.5 Scénario d'évolution très altérée « fonctionnement dégradé »

Le SEA de fonctionnement très dégradé avait été défini à titre conventionnel pour tester plus avant la robustesse du système de stockage. Ce SEA a été un « test » permettant de tester la robustesse d'ensemble du stockage dans le cadre du Dossier 2005.

Ce scenario sera reconduit pour la DAC mais il est considéré comme hors dimensionnement pour le stockage, sa vraisemblance et les hypothèses de ce scénario seront revues au regard de l'avancée de la connaissance notamment sur le site et le comportement des composants.

4.6 Performances à long terme des options de conception au stade de 2009

4.6.1 Démarche d'analyse du bon fonctionnement des options de conception

Sur le plan de la sûreté à long terme, l'objectif du jalon 2009 est double :

- vérifier le bon fonctionnement du stockage, compte tenu des évolutions de conception apportées, dans un contexte générique comparable à celui du Dossier 2005,
- examiner, sur l'ensemble de la zone de transposition, l'influence des caractéristiques intrinsèques de la formation hôte et du contexte piézométrique de ses encaissants sur les performances de confinement de la formation hôte.

Le principe de fonctionnement recherché pour le stockage après fermeture est inchangé par rapport au Dossier 2005 ; il s'agit de limiter les éventuelles migrations de radionucléides en solution à celles qui pourraient se produire par *diffusion à travers les gardes verticales* de formation hôte. Dans la mesure où aucune des évolutions de conception envisagées ne remet en cause la densité de stockage des déchets dans les modules, ni le principe de la garantie d'une épaisseur minimale de 60 m de gardes

verticales au dessus et en dessous des ouvrages, le fonctionnement de cette voie de transfert dominante n'est pas significativement modifié. Il fait l'objet des calculs du SEN du Dossier 2005.

L'évolution du positionnement relatif des éléments du stockage, de leurs connexions et l'éventualité de distances plus grandes entre les ouvrages d'accès imposent en revanche de prendre en considération le gradient de charge hydraulique horizontal imposé par les encaissants sus et sous-jacents ; il pourrait contribuer à augmenter les circulations hydrauliques dans certains ouvrages et accroître la contribution non souhaitée de cette voie de transfert vers les exutoires.

L'analyse des nouvelles options de conception comporte deux éléments :

- une comparaison directe des calculs et modélisations réalisés en 2005 d'une part, et des évaluations réalisées avec la même méthodologie et intégrant les évolutions de conception du jalon 2009 d'autre part ; chaque élément de conception étant pris en compte indépendamment chaque fois que l'individualisation est possible,
- des simulations combinatoires intégrant l'ensemble des options nouvelles retenues en référence.

Le scénario défaut de scellement est le scénario retenu pour évaluer le bon fonctionnement du stockage. En effet, en scénario d'évolution normale, les calculs de performance du Dossier 2005 ont montré que la voie de transfert des radionucléides par les ouvrages de stockage était toujours très inférieure à celle par le Callovo-Oxfordien du fait de l'efficacité des scellements. En revanche, le scénario d'évolution altérée « défaut de scellement » dans la situation « tous scellements défaillants » a montré une mobilisation de la voie de transfert par les ouvrages jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien. Cette mobilisation reste certes limitée et ne remet pas en cause la sûreté du stockage, mais elle permet de différencier l'influence sur la sûreté des options de conception considérées. C'est donc sur la base de ce scénario que seront appréciées les évolutions de conception.

Concernant l'analyse de sensibilité des indicateurs de performance au positionnement du stockage à l'intérieur de la zone de transposition en considérant la variabilité verticale et latérale de certains paramètres du Callovo-Oxfordien, le scénario retenu est le SEN. Cette analyse est présentée en section 4.6.8.

Comme pour le Dossier 2005, et compte tenu des cinétiques de transfert mises en jeu, les simulations numériques réalisées s'appliquent à une situation de saturation complète de l'ensemble des ouvrages, à un fonctionnement hydraulique stabilisé et constant dans le temps (régime permanent) et à des milieux poreux continus équivalents. Les calculs considèrent une architecture à terminaison susceptible de contenir la totalité de l'inventaire du MID et sont menés sur une durée d'un million d'années de manière à toujours couvrir la date du maximum de relâchement par la voie de transfert du Callovo-Oxfordien.

Indicateurs

Des indicateurs intermédiaires qui traduisent plus directement l'effet des évolutions analysées ont été préférés à la dose dont l'évaluation intègre un très grand nombre de paramètres et particulièrement les incertitudes sur la biosphère. Ces indicateurs intermédiaires sont notamment :

- la distribution des débits d'eau sortant de différents ouvrages d'accès, ou y entrant, qui permet de quantifier les modifications apportées au fonctionnement hydraulique d'ensemble du stockage, en association avec une cartographie des flux convectifs dans les galeries,
- les historiques de débits molaires associés à ces voies de transfert et comparés à ceux des sorties par le Callovo-Oxfordien, notamment pour ce qui concerne les niveaux maximaux atteints et les dates d'occurrence de ces maximums.

Les vérifications faites consistent à s'assurer que les modifications éventuelles apportées au processus de transport des radionucléides dans les ouvrages ne remettent pas en cause une forte dominance du transport diffusif à travers l'épaisseur de la formation hôte.

Paramètres de calcul

Tous les paramètres de calcul, à l'exception de ceux traduisant spécifiquement l'évolution de conception analysée, sont pris avec des valeurs identiques à celles retenues pour les évaluations du Dossier 2005 : paramètres hydrauliques (perméabilité et porosité cinématique), épaisseur du Callovo-Oxfordien (130 m), paramètres de transport des radionucléides (diffusion effective et porosité accessible à la diffusion), géométrie des ouvrages et représentation de l'EDZ (en deux zones distinctes, zones fracturée et zone micro-fissurée), notamment. Pour la zone HA, les corrections du coefficient de diffusion et de la perméabilité en fonction de la phase de perturbation thermique sont appliquées.

Le gradient horizontal déterminé par la répartition des charges hydrauliques dans l'encaissant supérieur est un élément qui n'avait pas été considéré dans le Dossier 2005 du fait du groupement de l'ensemble des puits à l'extérieur des zones de stockage. Cette disposition « borgne » au niveau du stockage entier, ouvrait la possibilité de placer le groupe des puits en amont des zones de stockage (pour limiter les possibilités d'écoulements en direction des puits). Le calcul effectué dans le Dossier 2005 est un calcul enveloppe par le choix d'un gradient montant majorant sans avoir à considérer un gradient horizontal ni son orientation.

Pour le calcul des options de conception du jalon 2009 qui comporte un « dégroupement » des puits, le gradient horizontal a été pris en compte avec sa plus grande valeur possible sur la zone de transposition, soit 0,014 m/m. Cette approche est également justifiée par le fait que le groupe principal de puits étant centré, il y a toujours une partie du stockage qui peut se trouver en amont hydraulique par rapport à eux. Deux orientations (parallèle aux galeries de liaison principales ou parallèle aux galeries de liaison secondaires), avec chacune deux sens d'écoulement, ont systématiquement été testées de façon à ne pas préjuger du positionnement « hydraulique » du stockage dans la zone de transposition, car la ZIRA n'était pas alors définie.

Inventaire radiologique considéré et localisation des déchets

Pour permettre une comparaison directe avec les évaluations du Dossier 2005, les activités initiales prises en considération sont celles des catégories de déchets MAVL (B1 + B5 + B6)[47] et HA (C3 + C4)[48] du Dossier 2005 qui présentent respectivement l'inventaire radiologique MAVL et HA le plus important. La Figure 4.6-1 rappelle la localisation des colis-types concernés dans l'architecture 2005. Pour simplifier la comparaison c'est l'iode 129, mobile, très peu réactif et de très longue période qui a été retenu pour les calculs de transport en milieu poreux.

N.B. : Dans le Dossier 2005, chaque catégorie de déchet a été traitée indépendamment en considérant un scénario spécifique, S1a[49] pour les C3 + C4 et S1b[50] pour les B1x. Les calculs « Jalon 2009 » ont été réalisés avec le scénario S1a pour les B1x également. Cela correspond à une très légère augmentation de l'inventaire initial qui n'a pas de conséquences sur les comparaisons effectuées (ajout de 2700 colis B5.2, soit 1,3 10^{10} Bq et 5.8 % de l'activité B1 + B5 + B6 en ^{129}I).

[47] Déchets activés et déchets de structure en conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C).
[48] Déchets vitrifiés UOX/MOX et UOX + Pu.
[49] Scénario correspondant au retraitement de l'ensemble des combustibles (UOx, URE et MOX).
[50] Scénario dans lequel les MOX sont stockés directement.

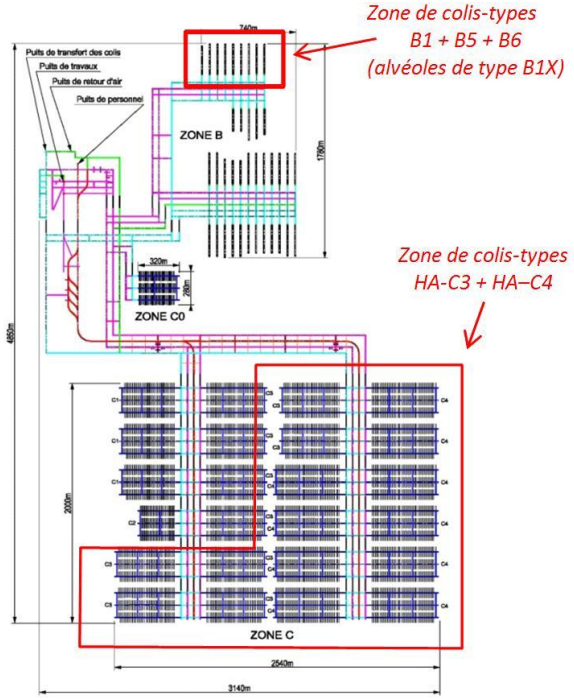


Figure 4.6-1 *Rappel de l'architecture du Dossier 2005 et figuration des zones de stockage et des catégories de déchets considérées pour l'analyse comparative des options du jalon 2009.*

N.B. : Les dénominations B1, B5, B6, C3 et C4 font référence aux colis types du MID 2005. Dans le contexte du MID 2009 les regroupements équivalents sont respectivement B9, B5.2.1, B5.2.2, B5.2.3, B5.4, B5.5, B3.3.6, B4.3, B4.2, B11.4, et B3.3.7 pour les MAVL et C6 pour les HA. Les mentions suivantes sont utilisées dans la suite du document pour éviter les ambiguïtés : B1x et C3+C4 (C6).

Options et combinaisons d'options traitées

L'analyse des évolutions d'options de conception retenues en référence pour le jalon 2009 et susceptibles d'impacter l'architecture à terminaison, et donc les performances du stockage après fermeture, est présentée de la manière suivante :

- implantation centrée du groupe de puits principal et sensibilité à la longueur des galeries de liaison principales (analyse pour la zone HA) (Cf. 4.6.2),
- ajout d'une descenderie double-tube déroulée (Cf. 0),
- alvéoles MAVL « passantes », galeries de retour d'air périphériques et ajout d'un puits de retour d'air MAVL dégroupé (Cf. 4.6.4),
- augmentation de la longueur des alvéoles MA et réduction de leur diamètre (Cf. 4.6.5),
- réduction du nombre de galeries par faisceau, passage à 2 x 5 modules dans la zone HA (Cf. 4.6.1).

Le principe d'une comparaison directe des performances des options de conception retenues à ce stade avec celles évaluées pour le Dossier en 2005 présente cependant deux limites :

- l'individualisation d'une option et de ses effets spécifiques n'est pas toujours possible (par exemple la comparaison d'un inventaire à 150 % n'aurait pas beaucoup de sens s'il était réalisé avec une architecture 2005, non adaptée pour l'accueillir),
- différentes options peuvent avoir des effets synergiques ou antagonistes, en termes de fonctionnement hydraulique par exemple, dont la combinaison n'est pas facile à évaluer au vu des seules comparaisons individualisées ; les effets d'un gradient horizontal peuvent être maximisés en considérant indépendamment la situation la plus défavorable pour la zone MAVL et pour la zone HA, par exemple, mais l'addition des indicateurs ainsi obtenus ne correspond à aucune situation physiquement possible.

En conséquence, des simulations combinant l'ensemble des évolutions de conception retenues pour le jalon 2009 ont été réalisées à l'échelle du stockage entier en complément des analyses séparées de chaque élément de conception (Cf. 4.6.7). Elles ne permettent pas une comparaison directe des indicateurs intermédiaires avec les architectures du Dossier 2005 dans lequel les différentes catégories de déchets étaient traitées séparément sans prise en compte des gradients horizontaux. Elles constituent en revanche une meilleure représentation de la réalité et constituent un pas important vers les modélisations « géo-localisées » qui pourront être développées pour la DAC, au sein de la ZIRA, avec une ou des implantations fixées du stockage. La modélisation actuelle « non implantée » permet déjà une comparaison pertinente des architectures SB (scénario de base) et SD (scénario de dimensionnement).

Ces évaluations à but de comparaisons d'options de positionnement et d'architecture souterraine de stockage ont été menées avec les hypothèses du Dossier 2005 pour ce qui concerne les caractéristiques intrinsèques de la formation hôte et le contexte hydrogéologique. Elles ne tiennent pas compte des avancées de connaissance maintenant disponibles suite aux reconnaissances complémentaires réalisées en 2007-2008. Une série de simulations, appliquée à l'architecture 2005, mais intégrant les caractéristiques mesurées au droit de cinq plateformes de forages réparties sur la zone de transposition (profils de perméabilité, coefficient de diffusion, épaisseur, charges hydraulique dans les encaissants …) complète l'analyse. Elle est décrite en fin du présent chapitre (Cf. 4.6.8) au titre d'une confirmation de la validité des comparaisons 2005-2009 pour l'ensemble des positionnements de stockage possibles.

4.6.2 Implantation du groupe de puits principal et sensibilité à la présence de puits de retour d'air (analyse pour la zone HA)

Cette option consiste à implanter le groupe principal de puits dans une position centrale, entre les zones HA et MAVL (Cf. Figure 4.6-2). Elle induit plusieurs modifications susceptibles d'impacter le fonctionnement hydraulique et les processus de transport des radionucléides :

- le déplacement du groupe de puits par rapport aux zones HA et MAVL fait qu'il y a toujours une partie du stockage qui se trouve en amont hydraulique des puits relativement au gradient hydraulique horizontal,
- le déplacement du groupe de puits s'accompagne d'une modification du linéaire de galeries qui peut avoir des répercussions sur le fonctionnement hydraulique (modification de la capacité de drainage du réseau de galeries, modification de l'effet potentiel d'un gradient horizontal entre zone HA et puits) et sur les processus de transport (diminution des surfaces de galerie offertes à la diffusion vers l'argilite et du temps disponible pour la réaliser).

L'analyse de cette option a été décomposée selon les deux grandes zones du stockage (HA et MAVL) de manière à permettre une comparaison avec le Dossier 2005. Dans chaque cas, quatre orientations du gradient horizontal par rapport à l'ensemble puits groupés – zone de stockage (MAVL ou HA) ont été étudiées. L'analyse groupée de plusieurs des options relatives à la zone MAVL est présentée à la section 4.6.4. La section 4.6.7 complète l'analyse en exposant les résultats d'un calcul combinatoire incluant l'ensemble des options de référence du jalon 2009.

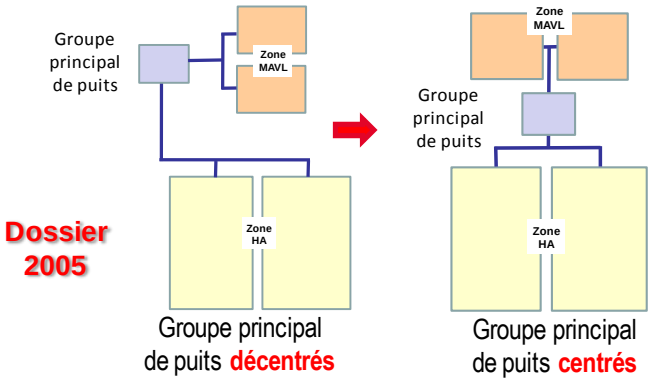


Figure 4.6-2 *Schémas de principe des architectures de stockage HA-MAVL à puits groupés décentrés (Dossier 2005) et à puits groupés centrés (Dossier 2009).*

Rappel du Dossier 2005

La Figure 4.6-3 rappelle les résultats des calculs de référence SEA « tous scellements défaillants » du Dossier 2005 pour les déchets HA C3+C4 (C6). Le scénario de défaut des scellements se traduit pour les sorties du Callovo-Oxfordien par un maximum à 215 000 ans environ au lieu de 475 000 ans environ pour le SEN. Cet effet résulte en grande partie de l'hypothèse complémentaire d'un terme source verre pénalisant[51] à mobilisation moins lente. Le niveau du maximum, en revanche, est peu modifié par rapport au SEN : 1,3 10^{-3} mol/an au lieu de 7,9 10^{-4} mol/an, soit un accroissement de l'ordre de 65%. L'apparition d'une sortie par les puits montre l'intérêt de focaliser l'analyse comparative sur cette voie de transfert et de considérer la situation « tous scellements défaillants » qui est susceptible de la maximiser.

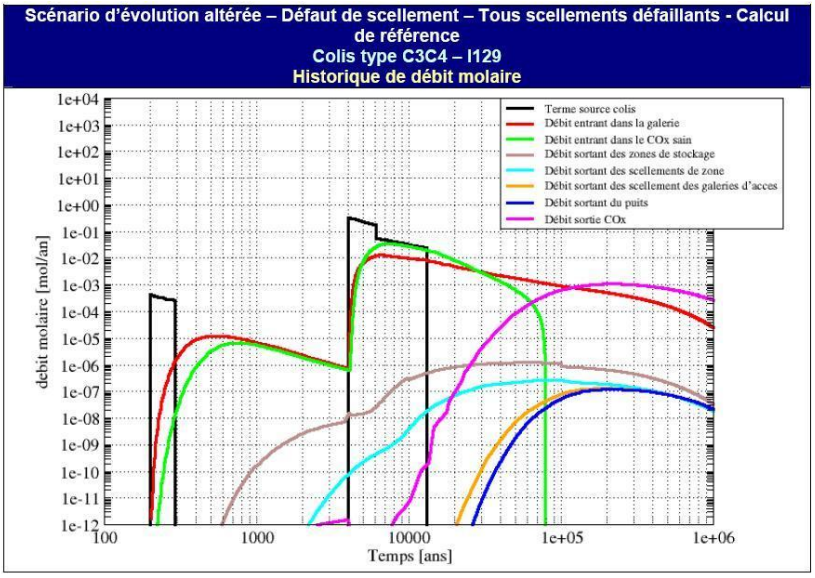


Figure 4.6-3 *Historiques de débits molaires HA C3+C4 (C6) à 1 Ma du Dossier 2005 (puits groupés décentrés). SEA « tous scellement défaillants » (gradient vertical ascendant 0,2 m/m, gradient horizontal nul, sortie Callovo-Oxfordien = toit + mur, terme source verre pénalisant).*

[51] Modèle de relâchement V0.S pour le SEA défaut de scellement et V0.S-Vr pour le SEN.

Effet des gradients verticaux et horizontaux

Le SEA « tous scellements défaillants » de 2005 (à puits groupés décentrés) a été évalué avec un gradient vertical montant de 0,2 m/m correspondant au maximum possible dans le contexte hydrogéologique « à l'actuel » (Cf. Tableau *4.6-1*). En l'absence de gradient horizontal, et pour un même linéaire de galeries, le calcul pour des puits groupés centrés est identique.

Tableau 4.6-1 *Rappel du SEA « tous scellements défaillants » puits groupés décentrés (Dossier 2005). Historique des débits molaires d'iode 129 sortant du Callovo-Oxfordien et débit d'eau par les puits. Cox : Callovo-Oxfordien.*

Zones HA C3+C4 (C6) SEA tous scellements défaillants	Sortie	Gradient vertical (m/m)	Gradient horizontal (m/m)	Date du maximum ^{129}I (an)	Valeur du maximum ^{129}I (mol/an)	Débit (sortie + entrée -) (m^3/an)
Dossier 2005 (Puits groupés excentrés) et Evaluations jalon 2009 (Puits groupés centrés)	Cox (toit et mur)	0,2	0	214 000	$1{,}1\ 10^{-3}$	-
	Puits	0,2	0	210 000	$1{,}2\ 10^{-7}$	1,7

Une série de calculs a permis de mesurer l'effet de différentes configurations de gradients verticaux et horizontaux sur l'architecture puits groupés et centrés de l'option « Jalon 2009 ». Le doublement du gradient vertical correspondant au modèle à 1 Ma de 2005 induit un doublement du débit sortant par les puits groupés (lorsque le gradient horizontal est nul) et une augmentation d'un facteur 7 de la masse d'iode 129 transitant par les ouvrages sur cette durée. Le débit s'accroît de 50 % supplémentaires dans la situation de gradient horizontal la plus défavorable avec les puits en aval hydraulique de la zone HA. L'accroissement de la vitesse dans les galeries se traduit par une réduction de la diffusion vers le Callovo-Oxfordien, et en conséquence par une augmentation des maxima devenus plus précoces.

Néanmoins, même dans la situation piézométrique la moins favorable, le rapport des maxima de débit molaire, de la voie de transfert par la sortie « Callovo-Oxfordien » d'une part, et de la voie de transfert par les « puits » d'autre part, reste supérieur à 500. Dans cette même situation, la sortie par les puits est légèrement prédominante jusqu'à 18 000 ans environ, mais à des niveaux très faibles, à plus de 4 ordres de grandeur par rapport au maximum de la sortie du Callovo-Oxfordien (Cf. Figure 4.6-4 et Tableau *4.6-2*).

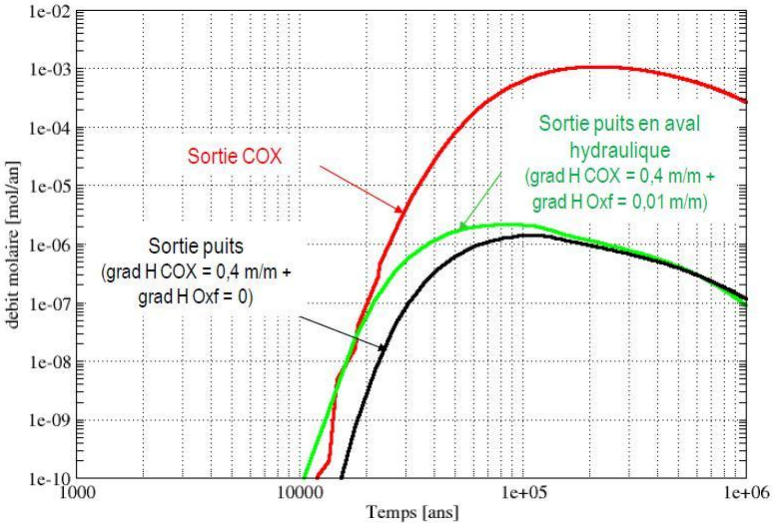


Figure 4.6-4 *Historiques de débits molaires C3+C4 (C6) à 1 Ma du Dossier 2005 (puits groupés décentrés). SEA « tous scellement défaillants » (gradient vertical ascendant 0,4 m/m, gradient horizontal nul et gradient horizontal 0,014 m/m).*

Effet d'une réduction du linéaire de galeries de liaison

La possibilité d'une distance réduite à 500 m entre la zone HA et le groupe des puits centrés est envisagée pour répondre à une optimisation technico-économique des galeries de liaison (Tableau *4.6-2*). L'occurrence des arrivées en sortie des puits est légèrement plus précoce (environ 20 000 ans) et on constate une légère augmentation du maximum (environ 30 %) bien que le débit d'eau sortant soit réduit. La période pendant laquelle la sortie par les puits est plus importante en niveau relatif se prolonge d'environ 5 000 ans mais son rapport avec le maximum de la sortie par le Callovo-Oxfordien reste inférieur à 1/2000.

Tableau 4.6-2 *Calculs 2009 tous scellements défaillants avec puits groupés centrés – Effet des gradients verticaux et horizontaux sur les débits molaires et sur les débits d'eau sortant des puits.*

Zones HC3+C4 (C6) SEA « tous scellements défaillants »	Sortie	Gradient vertical (m/m)	Gradient horizontal (m/m)	Date du maximum (an)	Valeur du maximum (^{129}I mol/an)	Débit (sortie + entrée -) (m^3/an)
Puits groupés centrés	Puits	0,2	0	215 000	$1,7\ 10^{-7}$	1,7
		0,4	0	109 000	$1,4\ 10^{-6}$	3,4
	Puits (en aval hydraulique de la zone HA)	0,4	0,014	86 000	$2,1\ 10^{-6}$	5,1
	Puits (en aval hydraulique de la zone HA) Linéaire réduit de 1000 m à 500 m	0,4	0,014	68 000	$2,8\ 10^{-6}$	4,7

Sensibilité à la présence de puits de retour d'air dégroupés (zones HA)

Pour des architectures avec puits de retour d'air en extrémité de galeries de liaison principales également testées, aucune sortie prédominante par les puits n'est constatée, même à très faible débit molaire, et les résultats s'avèrent comparables à ceux de l'architecture à puits groupés. Ils s'expliquent par le fait qu'un accroissement des débits dans les galeries de liaison, y compris dans le cas d'une circulation en U, ne se traduit pas ici par une sollicitation hydraulique majorée des modules de stockage.

En conclusion

L'option de conception relative à un positionnement « groupé centré » des puits conduit considérer l'influence d'un gradient de charge horizontal entre la zone de stockage et les puits ; en effet ce gradient pourrait renforcer le moteur convectif et affaiblir, pour les radionucléides ayant atteint les galeries, la diffusion vers le Callovo-Oxfordien. L'analyse est faite sur la base du scénario d'évolution altérée « tous scellements défaillants ».

Les résultats des calculs montent que, même dans le cas d'un linéaire de galeries réduit à 500 m et d'un gradient horizontal défavorable qui tend à réduire les temps de transfert vers les puits, la sortie par le Callovo-Oxfordien reste fortement dominante avec un rapport entre son maximum et celui de la sortie « puits » de 400 environ. Une prédominance temporaire de la sortie puits est constatée jusqu'à 20 000 ans environ, mais pour des débits molaires ne dépassant pas 5.10^{-7} mol/an. L'intégration sur un million d'années des débits molaire de l'iode 129 ayant transité par les ouvrages jusqu'à la sortie des puits reste faible avec une proportion de l'ordre de 8.10^{-4} de la quantité d'iode 129 totale.

4.6.3 Ajout d'une descenderie double-tube

Le choix d'adopter une descenderie déroulée, plutôt qu'un puits ou qu'une descenderie enroulée, pour l'accès et le transfert des colis, conduit à s'interroger à propos de l'effet hydraulique possible de ces ouvrages à grande extension horizontale qui pourraient « chercher » plus loin que les puits verticaux des différences de charges dans l'encaissant supérieur.

Afin de garantir un calcul enveloppe tout en se libérant des questions relatives à l'étanchéité de la descenderie dans l'Oxfordien, la charge considérée à l'extrémité supérieure de la descenderie est celle constatée au droit de l'intersection entre descenderie et toit de l'Oxfordien (et non celle que le gradient horizontal déterminerait au toit du Callovo-Oxfordien). Pour la modélisation, cela revient à considérer un gradient horizontal de 0,074 m/m pour la zone de Callovo-Oxfordien dans laquelle est située la descenderie. (Au droit du stockage lui-même, le gradient horizontal de 0,014 m/m, conforme aux hypothèses du Dossier 2005, est conservé.) (Cf. Figure 4.6-5).

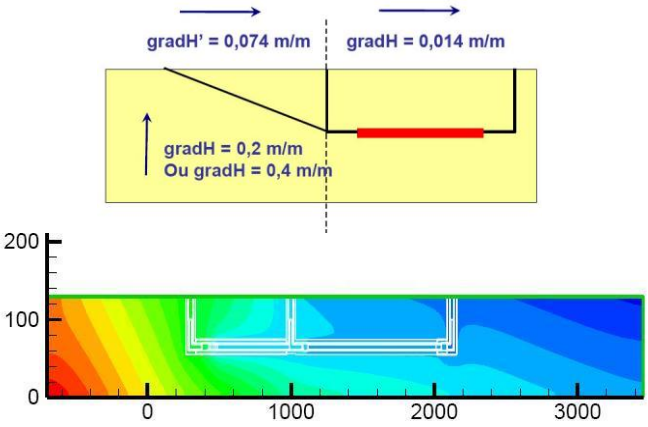


Figure 4.6-5 *Coupes verticales schématiques montrant les gradients hydrauliques considérés pour la simulation de l'effet d'une descenderie et sa conceptualisation sous forme d'un ouvrage composite galerie – puits.*

Les effets en termes d'hydraulique et de transport de solutés liés à l'ajout d'une descenderie déroulée ont été évalués en considérant les deux positions relatives d'une zone HA C3+C4 (C6), de puits groupés et d'une descenderie, susceptibles de subir le plus fort moteur hydraulique sous l'effet d'un gradient horizontal :

- gradient orienté parallèlement aux galeries de liaison principales avec descenderie en aval hydraulique des puits groupés, eux même en aval des zones de stockage,
- gradient orienté parallèlement aux galeries de liaison principales avec descenderie en amont hydraulique des puits groupés, eux mêmes en amont des zones de stockage.

Pour la première configuration, il apparaît que l'ajout d'une descenderie a pour effet principal de répartir les flux hydrauliques et les débits molaires sortant sur les deux accès, sans modification significative du maximum de la somme des sorties (Cf. Figure 4.6-6). Les temps d'occurrence des maxima sont retardés de 20 000 et 50 000 ans du fait des sections plus grandes disponibles pour le transport (Cf. lignes 2 à 4 du Tableau 4.6-3).

Dans la deuxième configuration (Cf. lignes 5 à 8 du Tableau 1.6-3), une circulation en U s'établit (entrée d'eau par la descenderie et sortie par les puits) mais elle est sans conséquences en termes de débit molaire sortant. Pour un gradient de 0,2 m/m le débit molaire sortant n'est pas quantifiable (inférieur à 10^{-10} mol/an). Même lorsque le gradient vertical est fixé à 0,4 m/m, le différentiel de débit apparent de 1,6 m^3/an circulant alors depuis les zones de stockage jusqu'au puits ne génère qu'une sortie tardive qui ne dépasse jamais $3{,}0.10^{-7}$ mol/an soit un facteur 3 500 par rapport au maximum de la sortie par le Callovo-Oxfordien.

Tableau 4.6-3 *Comparaison des sorties C3+C4 (C6) d'iode 129 par les puits groupés ou la descenderie pour le SEA « tous scellements défaillants ».*

Zones HA C3+C4 (C6) SEA tous scellements défaillants	Sortie	Gradient vertical (m/m)	Orientation du gradient horizontal	Date du maximum ^{129}I (an)	Valeur du maximum (^{129}I (mol/an)	Débit (sortie + entrée -) (m^3/an)
Puits groupés centrés	Puits	0,4	// galeries principales puits (et descenderie) en aval	86 000	$2,1\ 10^{-6}$	5,1
Puits groupés centrés avec descenderie en aval hydraulique	Puits			105 000	$5,3\ 10^{-7}$	1,2
	Descenderie			130 000	$1,5\ 10^{-6}$	4,0
Puits groupés centrés avec descenderie en amont hydraulique	Puits	0,2	// galeries principales puits (et descenderie) en amont	Pas de sortie		3,8
	Descenderie			Pas de sortie		-3,7
	Puits	0,4		600 000	$3,0\ 10^{-7}$	5,4
	Descenderie			Pas de sortie		-3,8

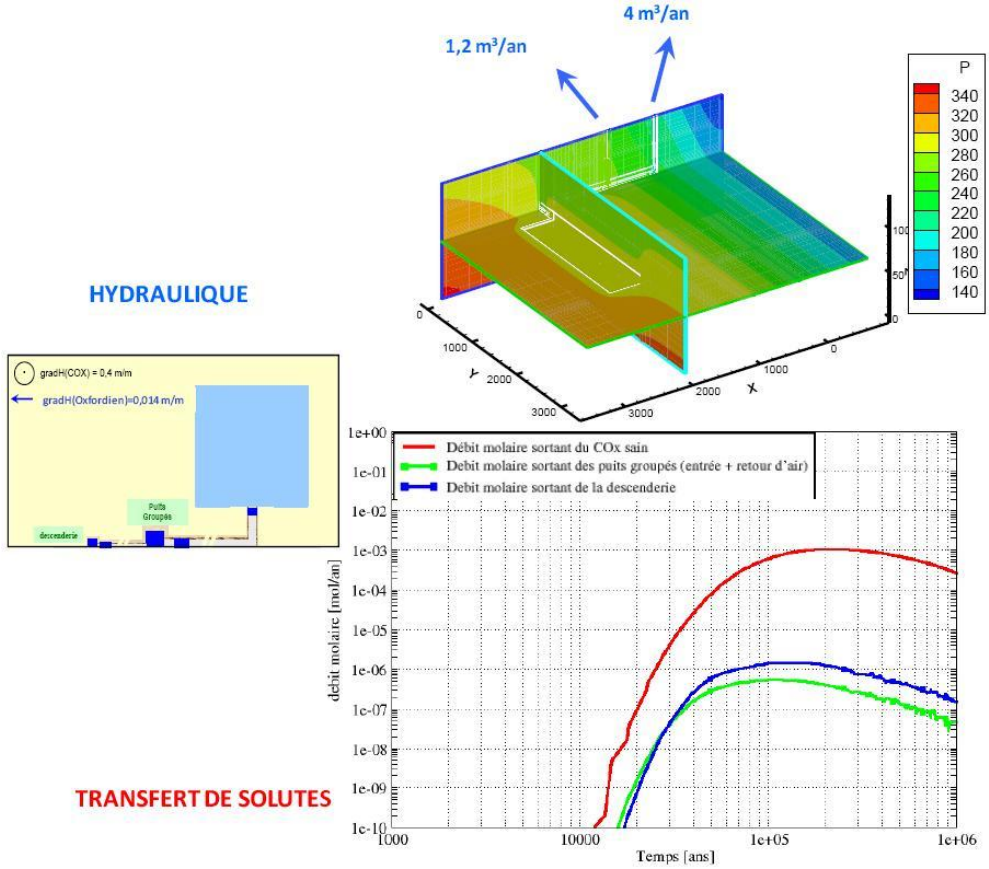


Figure 4.6-6 *Représentation du calcul Zone HA C3-C4 (C6) à puits centrés groupés et descenderie placés en aval relativement au gradient horizontal (parallèle aux galeries de liaison principales).*

Il apparaît que le système fonctionne en deux parties relativement indépendantes de part et d'autre des puits groupés, ces derniers jouant un rôle de déconnection hydraulique dans la situation de défaut de scellement généralisé.

- Lorsque la descenderie est en aval hydraulique des zones de stockage, le débit qu'elle appelle du fait d'une charge hydraulique plus faible est principalement prélevé sur le débit qui aurait transité par les puits en son absence ; de ce fait, son effet sur l'hydraulique et le transport dans les zones de stockage est très limité. Les flux hydrauliques et les masses de solutés, pratiquement inchangés au total, se répartissent entre les deux types d'accès et bénéficient ainsi d'un retard complémentaire.
- Lorsque la descenderie est en amont hydraulique, la charge hydraulique plus élevée qu'elle apporte est largement absorbée par le groupe de puits dont le débit, parfois « entrant » dans cette configuration, diminue et peut même s'inverser en un flux « sortant ». Dans ce dernier cas, une circulation en U s'établit entre les deux groupes de puits ; elle est néanmoins sans effets significatifs sur les débits molaires sortants car l'augmentation de charge apportée par la descenderie à la base des puits réduit les flux provenant des zones de stockage.

En conclusion :

Pour l'ensemble des configurations HA envisagées, la présence d'une descenderie déroulées à 10 % de pente ne conduit pas à une modification des maxima de débits molaires sortant des ouvrages ni à une modification significative des dates d'occurrence de ces maxima. Dans certains cas, ces ouvrages apportent un retard supplémentaire.

Le principe de fonctionnement de la descenderie étant clairement établi pour la zone HA, et en particulier un effet de déconnexion hydraulique relative assurée par le groupe de puits, ce type de simulation spécifique n'a pas été renouvelé pour l'analyse séparée de la zone MAVL. Une vérification d'ensemble a été effectuée à l'échelle du stockage sous la forme de la modélisation combinée de toutes les options de conception retenues à ce stade (Cf. 4.6.7).

4.6.4 Organisation de la zone MAVL

Rappel du Dossier 2005

La Figure 4.6-7 rappelle les résultats des calculs SEN et SEA « tous scellement défaillants » du Dossier 2005 pour les déchets B1x (calculs de référence).

L'introduction de défauts sur l'ensemble des scellements fait apparaître une sortie « puits » très tardive dont le maximum n'est pas encore atteint à 1 Ma, date à laquelle le débit molaire est de 2.10^{-7} mol/an. Le rapport entre cette valeur et le maximum de débit molaire sortant par le toit du Callovo-Oxfordien ($6{,}5.10^{-5}$ mol/an à 430 000 ans environ) est inférieur à 1/300.

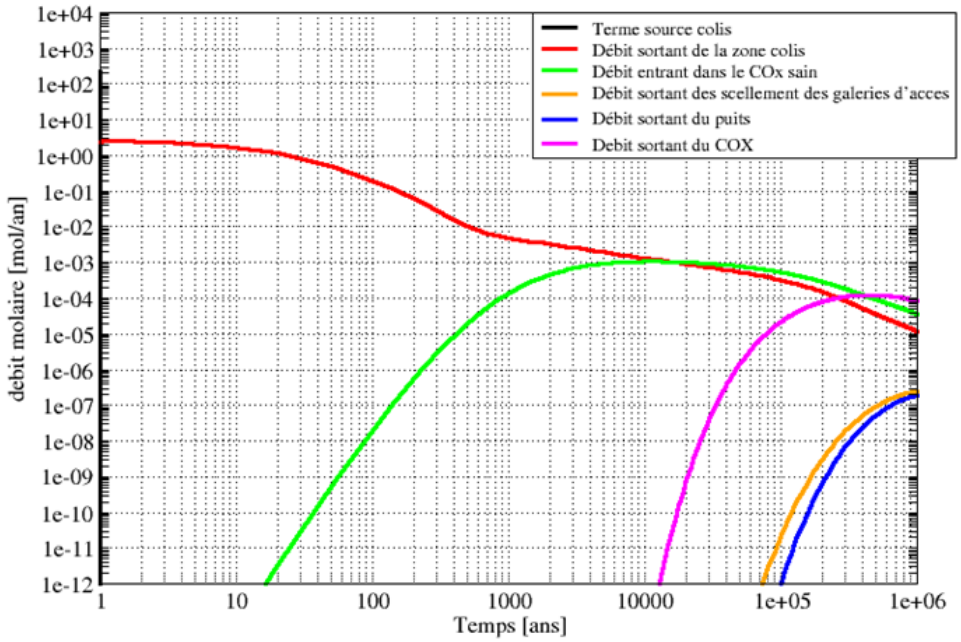


Figure 4.6-7 *Rappel des historiques de débits molaires B1x à 1 Ma du Dossier 2005 (puits groupés décentrés) pour le SEA « tous scellement défaillants » (gradient montant 0,2 m/m, gradient horizontal nul).*

Options de conception nouvelles ou modifiées dans la zone MAVL

Plusieurs options de conception retenues sont susceptibles de modifier le fonctionnement hydraulique de la zone MAVL : le recentrement des puits groupés, la disposition des modules en T, les alvéoles MAVL devenues « passantes », leur circuit de retour d'air périphérique et sa connexion à un puits « dégroupé » dédié. Elles ont été analysées simultanément pour vérifier le bon fonctionnement de la zone MAVL dans cette nouvelle configuration.

La section 4.6.7 qui présente la modélisation d'ensemble du stockage avec toutes les options de conception retenues complète cette analyse.

Implantation de puits de retour d'air (RA)

Plusieurs positionnements d'un ou deux puits de retour d'air ont successivement été évalués dans une phase exploratoire. La Figure 4.6-8 résume ces positions : un puits pour chaque zone MAVL placé à l'extérieur, un puits pour chaque zone MAVL situé sur la face intérieure des zones, et enfin un puits unique, moins dégroupé, situé entre les deux zones.

Le Tableau 4.6-4 présente pour chaque disposition la configuration hydraulique la plus défavorable. L'ensemble alvéoles passantes + galeries de retour d'air + puits de retour d'air dédié(s) dégroupé(s) induit une augmentation du maximum de débit molaire par la voie de transfert par les puits, et des sorties plus précoces, en comparaison de l'option de conception de référence du Dossier 2005 : alvéoles borgnes + puits groupés. Selon l'orientation du gradient de charge horizontal, la voie de sortie « puits » prédominante est le puits de retour d'air dégroupé ou l'ensemble de puits groupés et centrés.

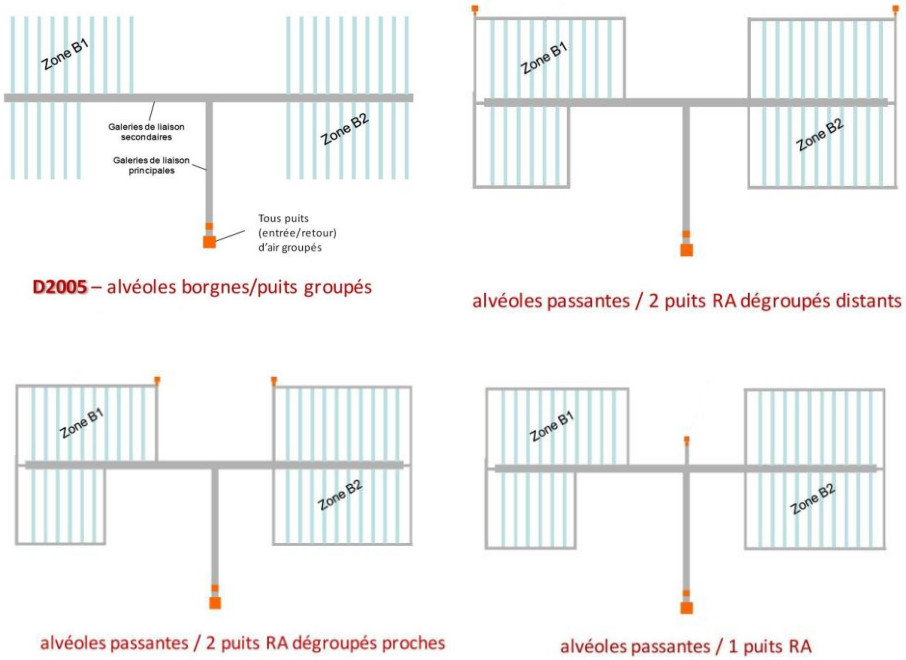


Figure 4.6-8 *Configurations de la zone MAVL : puits groupés centrés du dossier 2005 (haut gauche), alvéoles passantes avec 2 puits de retour d'air éloignés (haut droite), alvéoles passantes avec 2 puits de retour d'air proches (bas gauche), alvéoles passantes avec 1 puits de retour d'air central peu dégroupé (bas droite).*

Tableau 4.6-4 *Comparaison des sorties par les puits groupés et par le(s) puits de retour d'air MAVL de l'iode 129 pour les configurations hydrauliques les plus défavorables. (GLS : galeries de liaison secondaires. GLP : galeries de liaison principale.)*

Zones MAVL (B1x) SEA tous scellements défaillants	Sortie	Gradient vertical (m/m)	Orientation du gradient horizontal	Date du maximum ^{129}I (an)	Valeur du maximum ^{129}I (mol/an)
2 puits de retour d'air distants placés sur les coins externes des zones MAVL à l'opposé de la zone centrale	Puits de retour d'air B1	0,4	// aux GLS PRA en aval	490 000	$7,8\ 10^{-6}$
	Puits groupés			600 000	$1,9\ 10^{-7}$
	Puits de retour d'air B1		// aux GLP Puits groupés en amont	Pas de sortie	
	Puits groupés			560 000	$8,7\ 10^{-6}$
2 puits de retour d'air proches placés sur les coins internes des zones MAVL à l'opposé de la zone centrale	Puits de retour d'air B1	0,4	// GLP Puits groupés en amont	500 000	$7,3\ 10^{-6}$
	Puits groupés			Pas de sortie	
	Puits de retour d'air B1		// GLS PRA en aval	640 000	$2,6\ 10^{-7}$
	Puits groupés			625 000	$6,6\ 10^{-6}$
1 puits de retour d'air central commun aux deux zones, faiblement dégroupé par rapport à la zone centrale (option jalon 2009)	Puits de retour d'air B1	0,4	// GLP PRA en amont (Cf. Figure 4.6-9)	Pas de sortie	
	Puits groupés			600 000	$7,5\ 10^{-6}$

Les enseignements suivants peuvent être déduits des analyses de la zone MAVL :

- Pour l'ensemble des dispositions relatives des puits et du gradient de charge horizontal, pendant la période de 1 Ma simulée, le débit molaire cumulé sortant des différents puits reste toujours inférieur au débit molaire sortant au toit du Callovo-Oxfordien. Le rapport entre les maxima de ces deux voies de transfert est toujours supérieur à un facteur 7.
- Les différentes dispositions sont proches en termes de fonctionnement hydraulique et de transport de radionucléides mais elles peuvent être hiérarchisées. La disposition à deux puits de retour d'air coté interne est plus proche des résultats du Dossier 2005 que la disposition avec puits distants du fait d'un moindre effet du gradient de charge horizontal. La disposition à puits unique peu décentré est elle-même encore plus proche de la référence 2005 avec une date de maximum à 600 000 ans environ et un rapport entre les maxima de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien et de l'ensemble des puits proche de l'ordre de grandeur.
- L'intégration des débits molaires transitant dans les différents compartiments du système de stockage sur le million d'années démontre une très forte prédominance de la voie Callovo-Oxfordien dans tous les cas étudiés (la fraction transitant par les ouvrages vaut 0,022 de l'inventaire initial d'iode 129, par exemple pour la situation à 2 puits de retour d'air distants, gradient vertical de 0,4 m/m montant, et gradient horizontal de 0,014 m/m parallèlement aux galeries de liaison principales vers les zones MAVL).

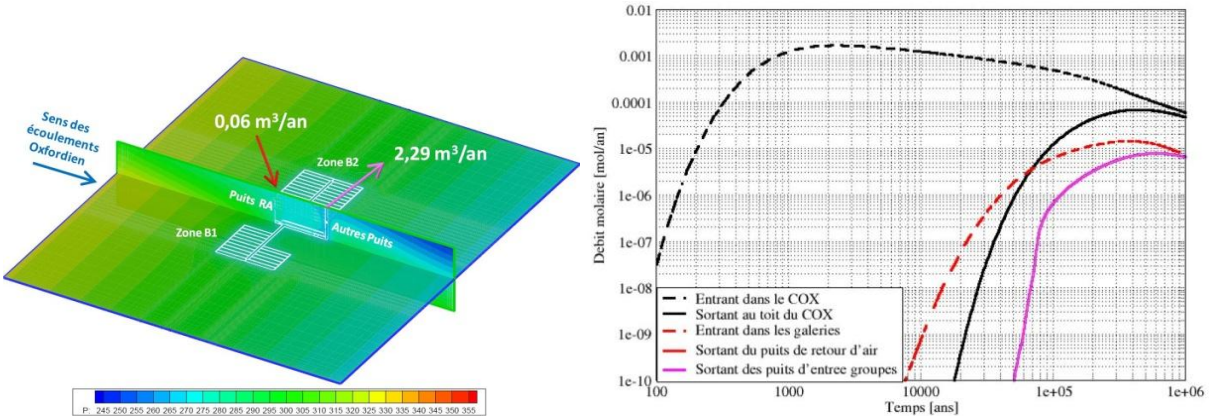


Figure 4.6-9 *Zone MAVL avec puits de retour d'air unique peu dégroupé (référence jalon 2009). Historiques de débit molaires de l'iode 129 pour les déchets B1x (^{129}I). Débits entrant et sortant. Situation avec gradient horizontal de 0,014 m/m parallèle aux galeries de liaison principales et puits de retour d'air en amont, gradient vertical montant 0,4 m/m.*

Les valeurs présentées dans le Tableau 4.6-4 correspondent à une hypothèse de gradient montant « enveloppe » de 0,4 m/m qui tend à majorer les débits d'eau sortant par les puits et pourrait masquer l'effet du gradient hydraulique horizontal. Afin de vérifier qu'aucun « écrasement » artificiel du débit molaire de certaines des sorties par les puits ne peut en résulter, des simulations ont été faites avec un gradient hydraulique montant réduit à 0,2 m/m. Les deux configurations, potentiellement les plus sensibles à cet effet ont été retenues : celles d'un puits de retour d'air de zone MAVL 1 distant, placé en aval hydraulique, avec un gradient horizontal orienté selon les galeries de liaison principales ou secondaires.

Dans les deux cas, la réduction du gradient hydraulique vertical se traduit par la réduction d'un facteur 3 du maximum de débit molaire des sorties des puits concernées, sans effet significatif sur les temps d'occurrence. L'hypothèse d'un gradient de 0,4 m/m est donc bien « enveloppe » en termes de débit molaire sortant, même en cas de gradient horizontal.

<u>Evolution du diamètre des galeries et du puits de retour d'air</u>

Les résultats présentés plus haut prennent en compte une hypothèse de diamètre excavé de 5 m pour les galeries de retour d'air et pour le ou les puits dédiés. En complément de ce diamètre

« intermédiaire », il est apparu utile de comparer les résultats obtenus avec un diamètre réduit à 3.5 m et avec un second augmenté à 7,5 m, de manière à pouvoir évaluer sur des indicateurs de performance, les conséquences d'éventuelles contraintes techniques de réalisation.

La Figure 4.6-10 et le Tableau 4.6-5 montrent que des deux phénomènes antagonistes attendus, à savoir, l'augmentation de la perturbation hydraulique avec le diamètre du fait d'une moins grande résistance aux écoulements en lien avec l'extension de l'EDZ, et la diminution de la vitesse de Darcy du fait d'une plus grande section offerte, c'est le premier qui prédomine en termes de résultante sur le transport de l'iode 129. En effet, par rapport au diamètre de référence, le passage à 3,5 m se traduit par une réduction du maximum de débit molaire de 50 % environ alors que le diamètre de 7,5 génère une augmentation de 50 % environ. Dans ce dernier cas, le temps de transfert entre les alvéoles et le puits n'est plus suffisant pour permettre une atténuation significative par diffusion vers le Callovo-Oxfordien à partir des galeries. Le décalage en temps de l'occurrence des maxima entre les deux diamètres extrêmes est de l'ordre de 60 000 ans.

Le fonctionnement de la zone MAVL montre ainsi une sensibilité au diamètre des galeries et du puits de retour d'air et une plus grande robustesse lorsque le diamètre de ces ouvrages est réduit. Néanmoins, même dans cette configuration pénalisante de puits éloignés et de diamètre excavé de galerie de retour d'air de 7,5 m, non retenue pour le jalon 2009, la voie de transfert par les puits reste nettement minoritaire par rapport à la voie « Callovo-Oxfordien » avec un rapport des maxima proche de 5.

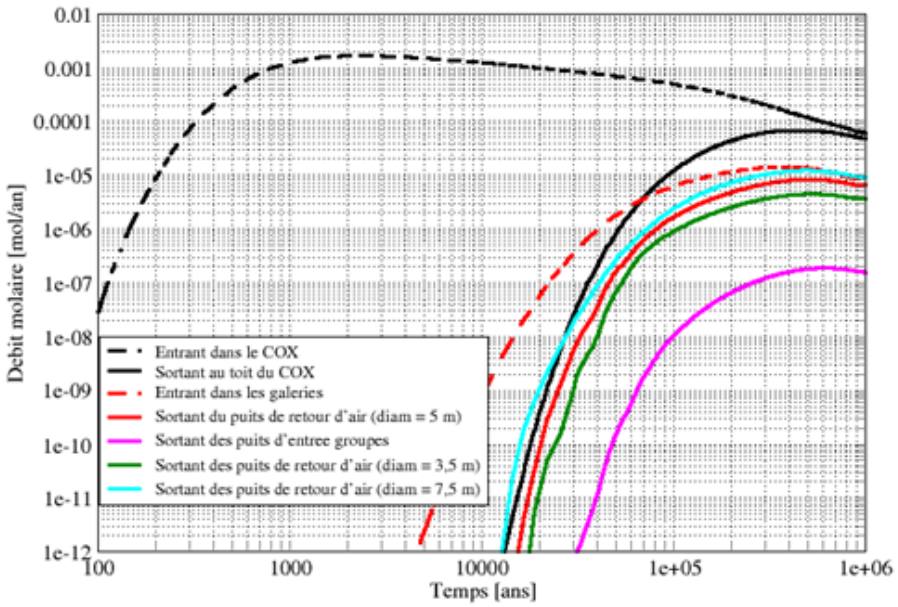


Figure 4.6-10 *Sensibilité au diamètre des puits de retour d'air d'une zone MAVL - Historiques de débit molaires pour les déchets B1x (^{129}I) - Architecture à puits de retour d'air distants. (Situation avec gradient horizontal de 0,014 m/m parallèle aux galeries de liaison secondaires et puits de retour d'air en aval. Gradient vertical montant 0,4 m/m.)*

Tableau 4.6-5 *Comparaison des sorties B1x par le puits de retour d'air pour 3 diamètres de puits de retour d'air et de galerie de retour d'air (SEA « tous scellements défaillants »).*

Zones MAVL (B1x) SEA tous scellements défaillants	Sortie	Gradient vertical (m/m)	Orientation du gradient horizontal	Date du maximum (an)	Valeur du maximum (^{129}I mol/an)	Débit (sortie + entrée) (m^3/an)
Puits de retour d'air distants Diamètre 3,5 m	Puits RA dédié	0,4	// galeries secondaires puits de retour d'air en aval	530 000	4,1 10^{-6}	0,36
	Puits groupés			600 000	2 10^{-7}	1,69

Zones MAVL (B1x) SEA tous scellements défaillants	Sortie	Gradient vertical (m/m)	Orientation du gradient horizontal	Date du maximum (an)	Valeur du maximum (^{129}I mol/an)	Débit (sortie + entrée) (m^3/an)
Puits de retour d'air distants Diamètre 5,0 m (Référence jalon 2009)	Puits RA dédié	0,4	// galeries secondaires puits de retour d'air en aval	490 000	$7,8\ 10^{-6}$	0,70
	Puits groupés			600 000	$2\ 10^{-7}$	1,66
Puits de retour d'air distants Diamètre 7,5 m	Puits RA dédié	0,4	// galeries secondaires puits de retour d'air en aval	470 000	$1,210^{-5}$	1,50
	Puits groupés			600 000	$2\ 10^{-7}$	1,52

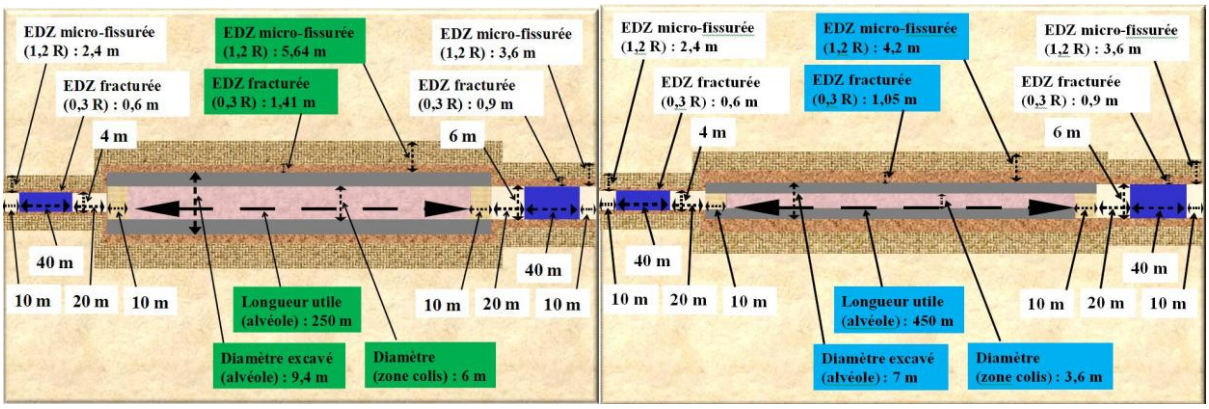
En conclusion :

Le choix de rendre les alvéoles MAVL passantes pour des motifs de sûreté en exploitation (ventilation), et la présence d'une galerie périphérique de retour d'air connectée à un puits de retour d'air dédié dégroupé, induisent une modification du fonctionnement hydraulique de la zone MAVL.

Les évaluations faites montrent cependant que même dans les situations les moins favorables, les débits molaires en iode 129 sortant au toit du Callovo-Oxfordien sont toujours supérieurs au cumul des débits molaires par la voie de transfert « ouvrages », quelle que soit la période considérée sur 1 Ma. Le rapport entre les maxima des voies de transfert « Callovo-Oxfordien » et « ouvrages » est toujours supérieur à 7 pour un diamètre de galerie de retour d'air et de puits de 5 m.

4.6.5 Augmentation de la longueur des alvéoles MAVL et réduction de leur diamètre

L'architecture évaluée à ce stade comprend des alvéoles de 400 m pour la partie réservée au stockage des colis (soit une longueur de 450 m au total) et un diamètre excavé réduit à 8 m ± 1 m correspondant à des empilements de colis 2 x 2. Une valeur de diamètre de 7 m a été choisie pour les calculs de manière à majorer la discrimination par rapport aux dimensions « 2005 ». La Figure 4.6-11 rappelle schématiquement les dimensions de l'alvéole « 2005 » « passante » et celles de l'alvéole « 2009 » allongée.



Alvéole « passante » dimensions 2005 Alvéole « passante » référence Jalon 2009

Figure 4.6-11 Coupe schématique des alvéoles MAVL passantes considérées pour les calculs.

La Figure 4.6-12 montre la comparaison, à l'échelle d'une alvéole, des débits molaires sortant vers les galeries (entrée et retour d'air) et vers le Callovo-Oxfordien (entrant dans la couche) pour différents dimensionnements et pour une source d'iode 129 unitaire[52]. Le passage d'une alvéole « borgne » à une alvéole « passante » de mêmes dimensions se traduit par une multiplication par 1,6 environ du maximum de débit molaire sortant vers la galerie. Le maximum de cette sortie reste environ 200 fois

[52] Calculs effectués pour des alvéoles contenant leur inventaire effectif en fonction de leur géométrie, les résultats étant ensuite normalisés à une mole d'iode pour permettre une comparaison directe.

inférieur à celui, inchangé, de la sortie se produisant par diffusion à partir de l'alvéole vers le Callovo-Oxfordien.

Dans la situation de défaut généralisé des scellements, deux types de phénomènes antagonistes sont susceptibles d'accompagner l'allongement d'une alvéole passante associé à une réduction de son diamètre : d'une part une augmentation de la surface drainée et donc une accélération de la vitesse convective, et d'autre part une facilitation du transfert des radionucléides par la voie « Callovo-Oxfordien » à partir des alvéoles du fait du fait de l'augmentation de leur longueur.

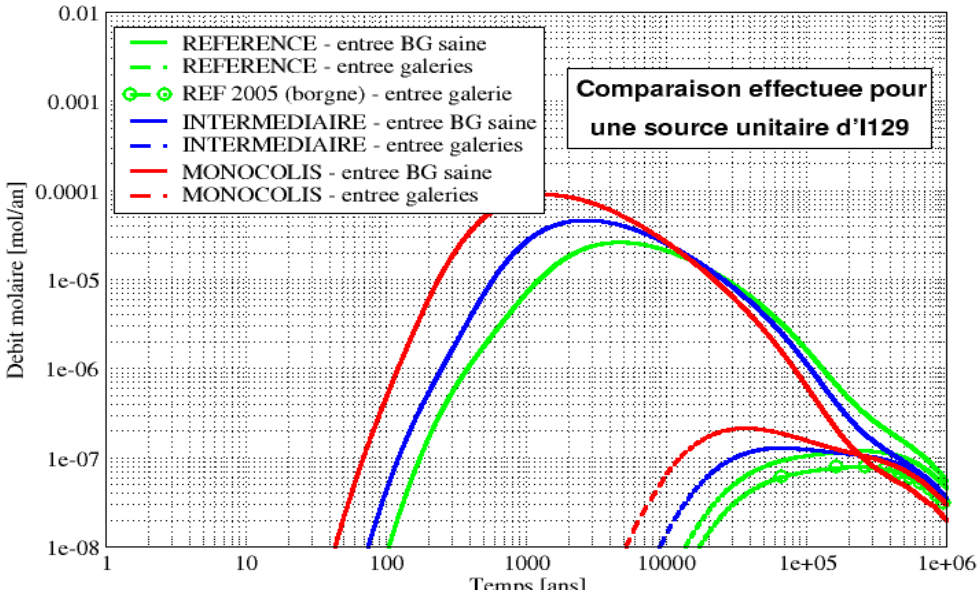


Figure 4.6-12 *Comparaison des historiques de débit molaire sortant de différents gabarits d'alvéoles MAVL pour une source unitaire d'iode 129 (BG saine = Callovo-Oxfordien, gradient vertical 0,2 m/m). REF 2005 : alvéole de 250 m borgne. Référence : alvéole de 250 m passante. Intermédiaire : alvéole jalon 2009 de 450 m passante. (Monocolis : piste d'optimisation à 800 m.)*

Les calculs montrent que les sorties sont plus précoces et légèrement plus intenses à la fois pour la voie galeries et pour la voie Callovo-Oxfordien. Le passage d'une alvéole de 250 m à une alvéole de 450 m représente un accroissement du débit molaire maximal entrant dans les galeries de 10 % environ et un accroissement du débit molaire maximal entrant dans le Callovo-Oxfordien de 70 % environ. Concernant les temps d'occurrence des maxima, ils sont avancés d'environ 200 000 ans à 60 000 ans vers les galeries et d'environ 4 500 ans à 2 500 ans pour la sortie vers le Callovo-Oxfordien. Ces faibles différences ne sont pas de nature à modifier la performance et la prédominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

Le Tableau 4.6-6 et la Figure 4.6-13 comparent les résultats de simulation obtenus pour les alvéoles passantes de 250 m et de 450 m à l'échelle de la zone MAVL. L'organisation retenue est celle d'un puits de retour d'air unique situé entre les zones MAVL et faiblement dégroupé par rapport au groupe de puits central (référence jalon 2009), avec un gradient horizontal orienté le long des galeries de liaison secondaires de la zone MAVL1 vers la zone MAVL2. Les calculs montrent un maximum de débit molaire sortant par les puits groupés légèrement plus élevé pour l'alvéole longue (de l'ordre de 1,5) et une quasi égalité du niveau de sortie par le puits de retour d'air. Ces maxima bien que légèrement plus précoces pour l'alvéole de 450 m se produisent après 400 000 ans.

Dans la situation de défaut de l'ensemble des scellements et de gradients défavorables, la somme des débits molaires sortant des ouvrages reste toujours inférieure au débit molaire sortant au toit du Callovo-Oxfordien. Le ratio des maxima reste inférieur à 1/6, même dans le cas d'une alvéole de 450 m.

Tableau 4.6-6 *Comparaison des sorties d'iode 129 par les puits pour 2 configurations d'alvéoles MAVL (SEA « tous scellements défaillants »).*

Zones MAVL (B1x) SEA tous scellements défaillants	Sortie	Gradient vertical (m/m)	Orientation du gradient horizontal	Date du maximum (an)	Valeur du maximum ^{129}I (mol/an)
Alvéole « passante » dimensions 2005 Diamètre excavé 10 m longueur 250 m	Puits RA dédié	0,4	// galeries secondaires puits de retour d'air en aval	590 000	1,1 10^{-6}
	Puits groupés centrés			600 000	5,8 10^{-6}
Alvéole « passante » dimensions 2009 Diamètre excavé 7 m longueur 450 m	Puits RA dédié	0,4	// galeries secondaires puits de retour d'air en aval	430 000	1,4 10^{-6}
	Puits groupés centrés			500 000	1,0 10^{-5}

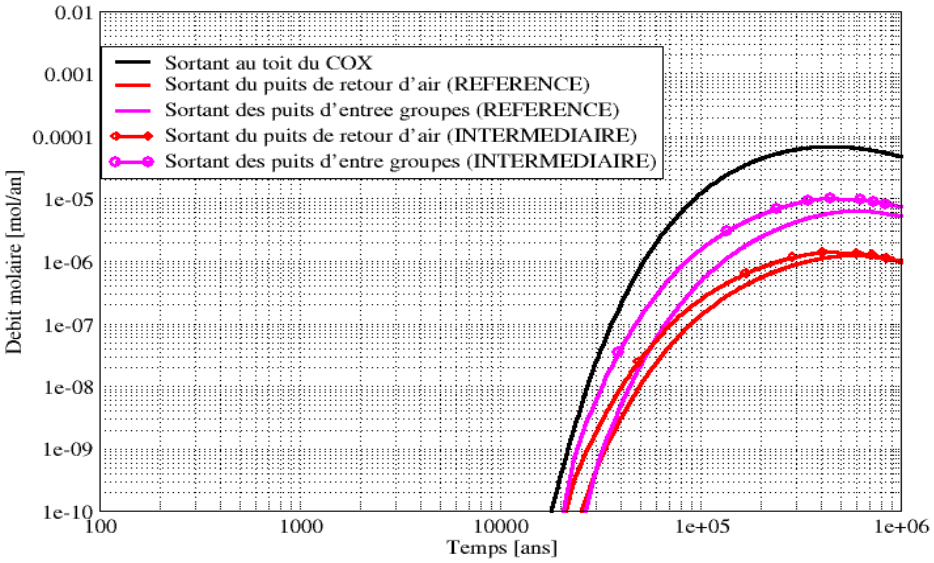


Figure 4.6-13 *Historiques de débits molaires de l'iode 129 pour les déchets B1x. (Alvéole « référence » : 250 m passante. Alvéole « intermédiaire » : 400 m passante. (SEA tous scellements défaillants, puits de retour d'air unique, gradient vertical ascendant 0,4 m/m, gradient horizontal 0,014 m/m de la zone MAVL1 vers la zone MAVL2)*

4.6.6 Réduction du nombre de galeries par faisceau et évolution du nombre de modules

Les conséquences d'une réduction du nombre de galeries dans les faisceaux de liaison (2 à 3 au lieu de 4 à 5 dans le Dossier 2005) ont été testées spécifiquement pour une zone MAVL, et en combinaison avec l'évolution du nombre de modules par sous-zones pour les zones HA.

Pour la zone HA :

Les résultats des calculs montrent que le passage de 4 à 2 galeries par faisceaux de liaison secondaires modifie peu les débits molaires d'iode 129 sortants pour un même nombre de modules par sous-zones (Cf. Figure 4.6-14). Le transfert convectif apparaît légèrement augmenté dans une proportion comparable à celle de la réduction de la section excavée cumulée qui est de 20 % environ. Cette faible sensibilité au nombre de galeries est interprétée par la prédominance de l'atténuation qui se produit au sein du module où la convection est lente quelque soit le nombre de galeries.

Le passage d'une architecture à 6 modules par sous-zones (celle du Dossier 2005) à une architecture à 5 modules par sous-zone se traduit par une différence légèrement plus marquée sur le débit molaire

d'iode 129 en sortie des ouvrages. En effet, le pic de relâchement se trouve avancé de 5 000 ans en sortie de scellement de zone et de 20 000 ans environ en sortie de puits, et les maxima se trouvent augmentés de 20 % environ. Cet écart est interprété comme la conséquence d'une diminution du temps de transfert convectif pour la fraction de l'inventaire que la géométrie à 5 modules rapproche des ouvrages de sortie.

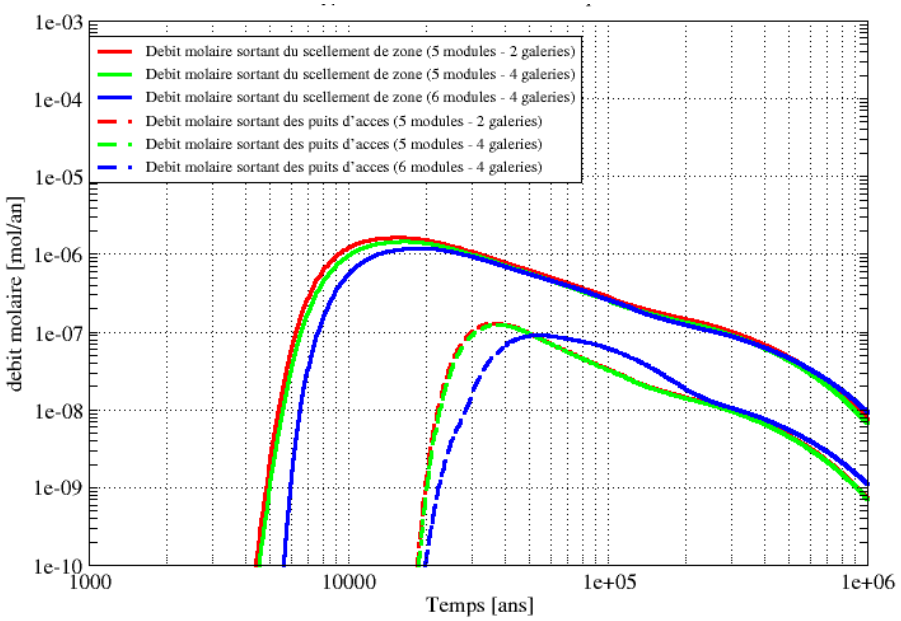


Figure 4.6-14 *Comparaison des historiques de débit molaire en iode 129 sortant des puits et des scellements de zones en fonction du nombre de galeries de liaison secondaires et du nombre de modules par sous-zone HA. (Gradient horizontal 0,2 m/m orienté vers le puits groupés).*

Pour la zone MAVL :

Cette situation a été testée dans la configuration comportant un puits de retour d'air commun aux deux sous-zones et proche du groupe de puits principal (configuration retenue pour le Jalon 2009), le gradient horizontal étant orienté parallèlement aux galeries de liaison secondaires en direction des puits. L'influence de la réduction du nombre de galerie de liaisons secondaires de 4 à 2 apparaît peu marquée sur le niveau maximum de la sortie dominante constituée par le groupe de puits central (Cf. Figure 4.6-15). Ce maximum est légèrement avancé mais survient toujours après 500 000 ans et reste inférieur d'un facteur 10 à celui de la sortie par le toit du Callovo-Oxfordien. Le maximum de la sortie par le puits de retour d'air croît d'un facteur 2 mais reste inférieur d'un facteur 30 environ par rapport au maximum de la sortie Callovo-Oxfordien.

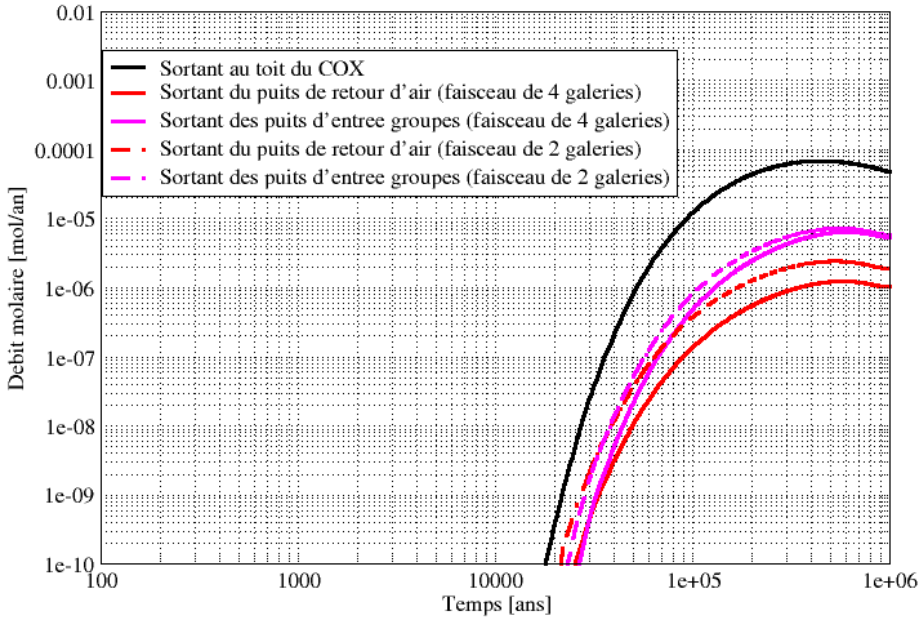


Figure 4.6-15 *Comparaison des historiques de débit molaire en iode 129 sortant des puits en fonction du nombre de galeries de liaison secondaires de zones MAVL. (Puits de retour d'air MA unique peu dégroupé, gradient vertical 0,4 m/m, gradient horizontal vers les puits)*

4.6.7 Modélisation combinatoire des options

4.6.7.1 La modélisation du scénario de base (SB)

Description du modèle combinatoire

Les analyses individualisées des options nouvelles ou modifiées qui font l'objet des sections 4.6.2 à 4.6.6 ont toutes été réalisées pour une situation très défavorable de défaut de l'ensemble des scellements permettant de discriminer au mieux le fonctionnement du stockage et la quantification des voies de transfert par les ouvrages. Pour chaque cas étudié, il a toujours été retenu la combinaison de situations hydrauliques verticale et horizontale la plus défavorable afin de ne jamais risquer de sous-estimer le débit molaire de la voie de transfert par les ouvrages. Cette méthode d'analyse permet de comprendre le sens d'évolution des modifications de fonctionnement à attendre de chaque option et l'écart maximal qu'elles pourraient générer si elles étaient mises en œuvre seules et dans des zones HA et MAVL sans influence hydraulique réciproque.

Une modélisation du stockage entier a été mise en œuvre de manière à représenter simultanément l'ensemble des zones de stockage, des galeries de liaison et des ouvrages d'accès. Cette modélisation d'ensemble a été rendue possible par le développement des outils depuis 2005 ; elle permet de prendre en compte toutes les interactions hydrauliques entre zones susceptibles de se produire en fonction des gradients hydrauliques horizontaux et verticaux imposés. Cette approche combinatoire renforce la confiance accordée aux calculs en confirmant le caractère enveloppe des évaluations séparées.

A l'étape actuelle, pour le jalon 2009, la modélisation conserve le principe de paramètres d'entrée « enveloppe » pour l'ensemble des situations susceptibles de se présenter à l'intérieur de la zone de transposition. Par exemple, l'épaisseur de Callovo-Oxfordien considérée reste 130 m comme dans le Dossier 2005 alors qu'elle est plus importante dans toute la zone de transposition (140 m au minimum au droit de la ZIRA proposée par exemple), et les avancées de connaissance concernant les propriétés de transport du Callovo-Oxfordien ne sont pas intégrées alors qu'elles tendent à améliorer sa performance globale. De cette manière, l'effet global des options 2009 sur les indicateurs intermédiaires ne peut pas être masqué par l'évolution de l'un des paramètres utilisés en 2005.

La Figure 4.6-16 représente le maillage complet du stockage et indique les 5 ouvrages d'accès prévus : descenderies, puits de retour d'air HA, puits personnel et puits travaux pour le groupe central et puits de retour d'air dégroupé pour la zone MAVL. Les galeries en faisceau sont regroupées sur la base de leurs sections équivalentes ; les longueurs de galeries et la disposition de l'ensemble des ouvrages de l'architecture de référence « Jalon 2009 » ont été respectées.

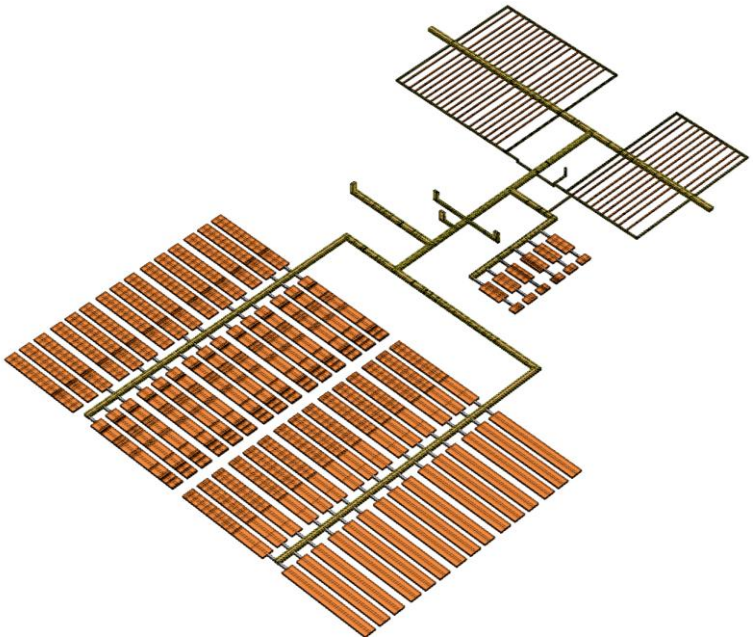


Figure 4.6-16 *Représentation du maillage utilisé pour la modélisation combinée de l'ensemble des évolutions de conception relatives au jalon 2009 (Architecture « SB »).*

Fonctionnement hydraulique

En cohérence avec le Dossier 2005 et avec les évaluations individualisées des options, un gradient vertical de 0,4 m/m a été retenu, et quatre orientations différentes d'un gradient horizontal de 0,014 m/m ont successivement été évaluées. Les inventaires considérés sont identiques à ceux des évaluations individualisées, à savoir MAVL B1x et HA C3+C4 (C6).

La Figure 4.6-17 illustre le fonctionnement hydraulique obtenu pour le cas d'un gradient horizontal orienté parallèlement aux galeries de liaison secondaires de la zone MAVL 1 vers la zone MAVL 2. Dans cette situation, il apparaît une séparation hydraulique des zones HA et MAVL (les flux d'eau issus de ces zones s'écoulent vers des ouvrages de liaison surface fond distincts).

Historiques de débit molaires

Les inventaires pris en compte pour cette architecture « SB » sont identiques à ceux des évaluations par zones. La Figure 4.6-18 et la Figure 4.6-19 représentent les historiques de débit molaires sur 1 Ma pour les deux configurations piézométriques donnant les plus forts débits molaires sortant par les ouvrages attribuables aux déchets B1x et aux déchets C3+C4 (C6), respectivement.

Pour les déchets B1x la situation piézométrique la plus défavorable est celle d'un gradient horizontal orienté de la zone MAVL vers la zone HA. Dans cette configuration, les 5 puits ont tous un débit sortant dont une partie provient des zones MAVL. Il n'y a pas de sorties par les ouvrages attribuable à la zone HA. La somme des débits molaires des puits atteint un maximum d'environ $5{,}8.10^{-6}$ mol/an pour une date d'occurrence de 530 000 ans environ. Le rapport de ce maximum à celui des sorties par le Callovo-Oxfordien est inférieur à 1/20 (cf. Figure 4.6-18). Ce résultat vient confirmer l'ensemble des résultats considérant la zone MAVL seule.

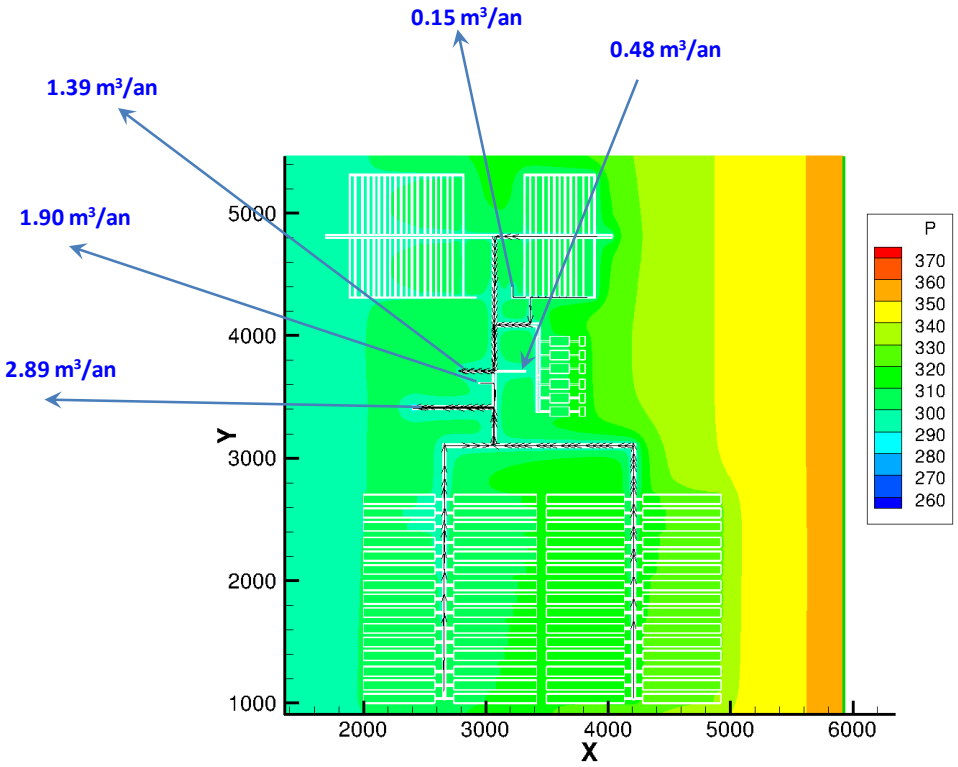


Figure 4.6-17 *Exemple de fonctionnement hydraulique d'ensemble du stockage pour le SEA tous scellements défaillants : cartographie des charges hydrauliques et des lignes de courant associées. (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m. Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone MAVL 1 vers la zone MAVL 2).*

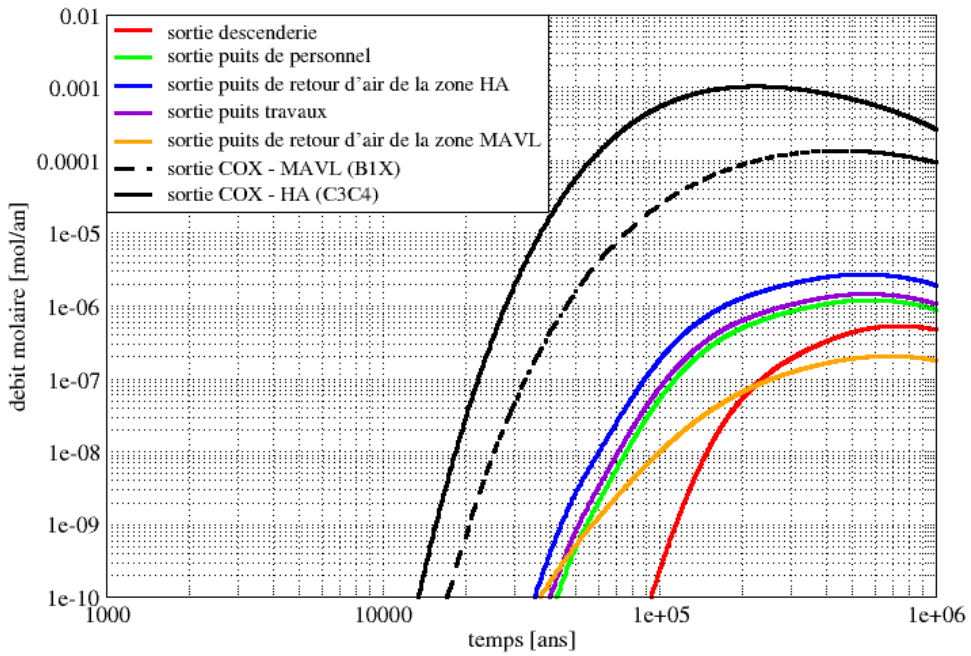


Figure 4.6-18 *Architecture « SB ». Historiques de débits molaires de l'iode 129 – SEA tous scellements défaillants - (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m. Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone MAVL vers la zone HA). L'ensemble des puits draine de l'eau en provenance de la zone MAVL.*

La situation piézométrique la plus défavorable pour ce qui concerne les déchets HA C3+C4 (C6) est celle d'un gradient horizontal orienté de la zone HA vers la zone MAVL. Dans cette configuration, la descenderie, le puits de retour d'air HA, le puits personnel et le puits travaux drainent de l'eau susceptible de provenir essentiellement des zones HA. Le puits de retour d'air MAVL ne draine que la zone MAVL. La somme des débits molaires des puits de la zone centrale, ayant pour contribution principale le relâchement de la zone HA, atteint environ 3.10^{-5} mol/an vers 375 000 ans environ, ce qui représente un ratio d'environ 1/50 par rapport au maximum de la voie de sortie par le Callovo-Oxfordien (Cf. Figure 4.6-19).

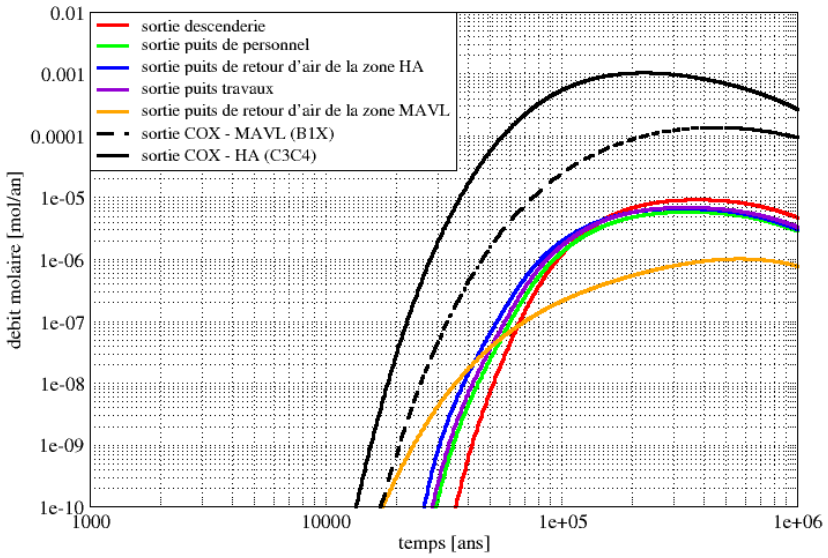


Figure 4.6-19 *Architecture SB. Historiques de débits molaire de l'iode 129 – SEA tous scellements défaillants - (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m. Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone HA vers la zone MAVL). Le puits « retour d'air MAVL » draine de l'eau en provenance de la zone MAVL, les trois autres puits de l'eau provenant de la zone HA.*

En conclusion :

La possibilité de modéliser le fonctionnement hydraulique d'ensemble du stockage est une évolution importante par rapport au Dossier 2005 pour lequel les zones HA et MAVL avaient été évaluées séparément. Les calculs permettent de mettre en évidence des influences réciproques complexes d'une zone sur l'autre et une répartition des flux entre les cinq ouvrages d'accès spécifique de chaque configuration piézométrique. Cette représentation est très utile pour comprendre et évaluer les évolutions de conception du Jalon 2009 qui réduisent le degré de « borgnitude » du stockage.

Les résultats obtenus montrent que malgré des fonctionnements hydrauliques très différents, pour la situation de défaut de scellements, selon les configurations piézométriques imposées, le stockage conserve un fonctionnement d'ensemble très robuste. En effet, ils confirment le maintien d'une très forte prédominance de la voie de transfert diffusive au travers du Callovo-Oxfordien même dans la situation altérée « tous scellements défaillants » et des maxima de flux molaires hors de la couche hôte, toutes voies confondues, quasiment identiques à ceux de l'option retenue dans le Dossier 2005.

Un intérêt supplémentaire de la modélisation globale du stockage est de montrer que les sorties précoces, temporairement prédominantes par rapport à la voie Callovo-Oxfordien, qui avaient été identifiées dans certaines configurations piézométriques ne sont pas retrouvées lorsque l'ensemble des effets hydrauliques réciproques et une géométrie plus réaliste des composants sont respectés. Enfin, il est bien mis en évidence que la configuration des gradients hydrauliques ne peut pas être la plus pénalisante à la fois pour les déchets HA et pour les déchets MAVL.

4.6.7.2 Influence de la capacité d'accueil (scénarios de base et de dimensionnement)

La modélisation « SB » (Scénario de base) correspond à une situation comparable, en termes d'inventaire, à celle du scenario S1a du Dossier 2005. Le maillage correspondant a été étendu et adapté pour pouvoir représenter l'architecture « SD » du scénario de dimensionnement de 2009. Dans les résultats présentés, les inventaires pris en compte pour les calculs correspondent à 150 % des C3+C4 (C6) et à 110 % environ des B1x.

La Figure 4.6-20 représente les historiques des sorties de l'iode 129 pour un gradient horizontal orienté de la zone MAVL1 (où sont supposés se trouver les B1x) vers la zone MAVL2. Dans cette situation la répartition des flux d'eau fait que le puits de retour d'air MAVL et le puits personnel drainent la zone MAVL alors que les sorties des puits de retour d'air HA et de la descenderie drainent la zone HA (idem Figure 4.6-17). L'augmentation de l'inventaire est visible sur les sorties par le Callovo-Oxfordien dans les proportions attendues. Des modifications de répartition des sorties sur les différentes voies « ouvrages » peuvent également être observées mais pour chaque zone, le rapport entre le maximum des débits molaires de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien et le maximum de la somme des débits molaires des sorties « ouvrages » reste dans l'ordre de grandeur de celui constaté pour la simulation « SB ».

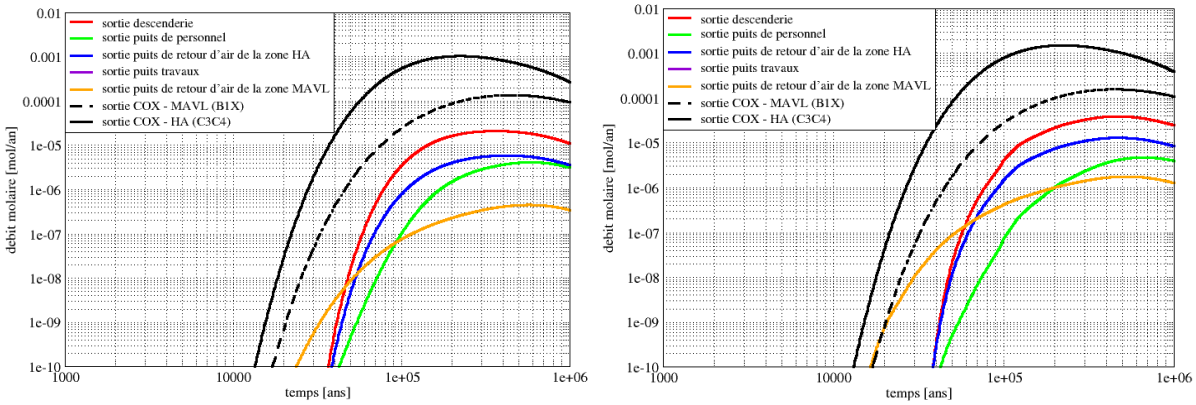


Figure 4.6-20 *Comparaison des architectures « SB » (à gauche) et « SD » (à droite). Historique de débit molaire de l'iode 129 – SEA tous scellements défaillants - (Gradient vertical ascendant de 0,4 m/m. Gradient horizontal de 0,014 m/m orienté de la zone MAVL1 vers la zone MAVL2).*

4.6.8 Evaluation des conséquences du positionnement dans la zone de transposition

Objectifs et paramètres de calcul

Les évaluations individualisées par zone de stockage, tout comme la modélisation complète du stockage, ont été réalisées sur la base de paramètres hydrodispersifs et géométriques de la formation hôte identiques à ceux retenus pour le Dossier 2005. Ce jeu de paramètres, choisi pour donner des évaluations « enveloppe » pour l'ensemble de la zone de transposition, définit en particulier : l'épaisseur de la formation hôte disponible, des perméabilités verticale et horizontale, des gradients de charge verticaux et horizontaux majorants ainsi que les paramètres de transport à considérer pour chaque radionucléide dans les différents matériaux considérés (argilites saines, EDZ, bentonite …).

Dans la perspective de proposition d'une ZIRA, la zone de transposition a fait l'objet de reconnaissances complémentaires en 2007 et 2008 avec comme objectifs principaux une meilleure représentation du contexte structural, une caractérisation plus fine de la formation hôte et une meilleure vision de la distribution de ses propriétés dans l'espace. La Figure 4.6-21 indique la localisation des cinq plateformes de forages réparties sur la zone de transposition.

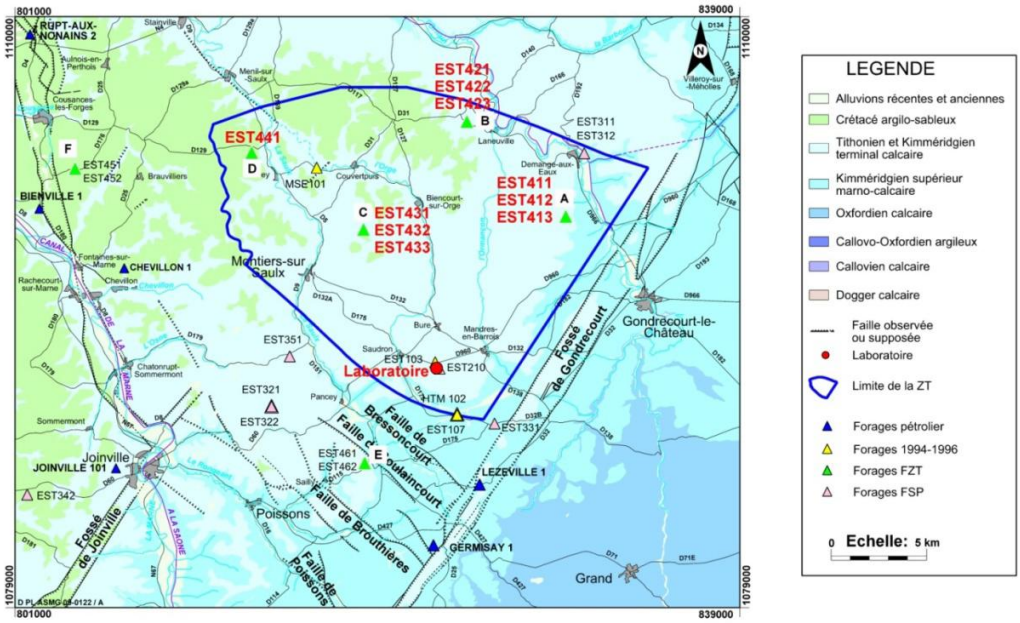


Figure 4.6-21 *Carte des cinq localisations retenues pour l'évaluation de la performance de confinement du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition (en rouge).*

Pour ce qui concerne la sûreté après fermeture, la vérification a été faite qu'aucune des avancées de connaissance n'est éventuellement de nature à remettre en question les principes de faisabilité du stockage considérés dans le Dossier 2005. Des calculs de performance ont été faits en ce sens, en ne testant que la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien. Ces calculs reprennent les principes de calcul du Dossier 2005, mais en considérant les paramètres géométriques et hydrodispersifs spécifiques des 5 plateformes de forage retenues pour l'évaluation de performances du Callovo-Oxfordien au sein de la zone de transposition.

Les paramètres « géo-localisés » retenus pour le calcul sont :

- l'épaisseur de la formation hôte (valeurs constatées sur chaque plateforme comprises entre 138,3 m sur le site du laboratoire et 163,8 m au droit de la plateforme EST413),
- les perméabilités verticales et horizontales définies selon 3 profils verticaux représentatifs de l'ensemble des observations faites (Cf. Figure 4.6-22),
- le gradient hydraulique vertical à l'actuel (compris entre -0,10 m/m au droit du laboratoire et +0,30 m/m pour EST441),
- le gradient hydraulique vertical pour 1 million d'années (compris entre +0,10 m/m au droit du labo et +0,38 m/m pour EST441),
- les paramètres de diffusion (Cf. Tableau 4.6-8) : coefficient de diffusion effectif et porosité accessible à la diffusion.

Tableau 4.6-7 *Valeurs des paramètres de diffusion retenus pour l'évaluation des performances de confinement dans la zone de transposition.*

	Coefficient de diffusion effectif (m^2/s)	Porosité accessible à la diffusion anionique	Coefficient de diffusion de pore (m^2/s)	Ratio entre les coefficients de pore (jalon 2009 et Dossier 2005 Argile)
Domaine Est : EST413, EST423 et Laboratoire	$5.5\ 10^{-12}$	0.075	$7.33\ 10^{-11}$	0.73
Domaine Ouest : EST433 et EST441	$4\ 10^{-12}$	0.065	$6.1\ 10^{-11}$	0.62

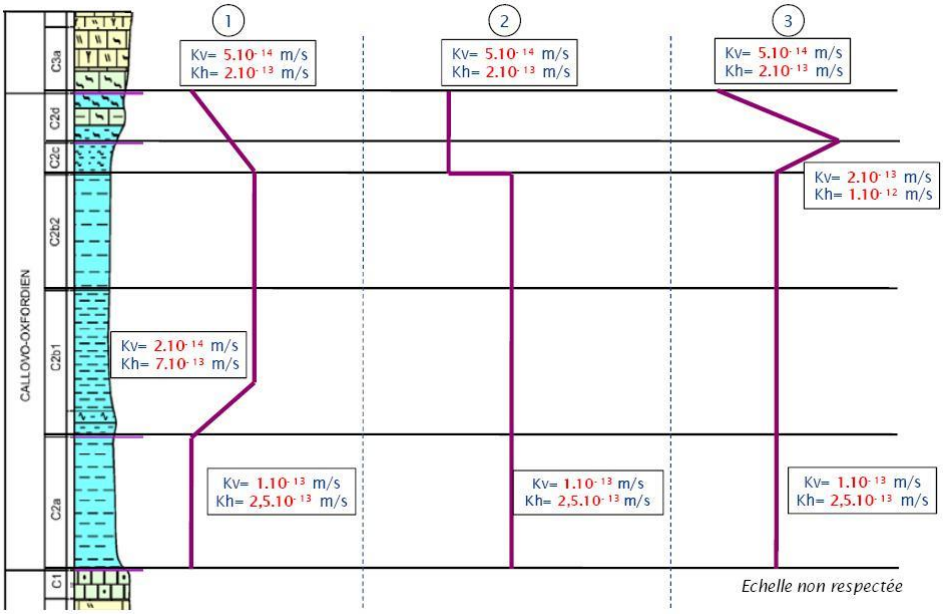


Figure 4.6-22 *Profils de perméabilités retenus pour l'évaluation de la performance de confinement dans la zone de transposition.*

Résultats et enseignements

Alors que les calculs pour l'analyse des options d'architecture s'appliquent au SEA « tous scellements défaillants », c'est l'analyse du fonctionnement du SEN qui est utilisée pour discriminer le fonctionnement de la voie de transfert « Callovo-Oxfordien ». Le Tableau 4.6-8 résume les résultats obtenus en termes de maximum de débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien et de temps d'occurrence du maximum.

En résumé :

- Le niveau de maximum de débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien et respectivement, le temps d'occurrence correspondant, sont finalement peu différents d'une plateforme à l'autre. La diffusion est dans tous les cas le processus dominant, seule une dissymétrie entre les sorties au toit et au mur dans les situations de gradient vertical ascendant les plus élevés fait apparaître une composante convective non négligeable pour la voie de transfert vers le toit du Callovo-Oxfordien.
- Les résultats actualisés apparaissant tous plus favorables que ceux calculés dans le cadre du Dossier 2005, en termes de niveau de relâchement en sortie de formation hôte (baisse d'environ 50 % pour les 5 localisations) et de date (au moins 140 000 ans de retard supplémentaire). Le caractère enveloppe des hypothèses 2005, et celui des comparaisons individualisées faites pour évaluer les options de conception 2009, sont confirmés.

Tableau 4.6-8 *Comparaison des sorties au toit du Callovo-Oxfordien pour des paramètres « formation hôte » spécifiques des différentes plateformes disponibles – Rappel du Dossier 2005 (SEN. C3 + C4)*

	EST413	EST423	EST433	EST441	Labo	Dossier 2005 Argile
Temps d'atteinte du maximum de débit molaire d'Iode 129 (ans en ordre de grandeur)	720.000	750.000	710.000	720.000	630.000	490.000
Maximum de débit molaire d'Iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien (Mol/an)	$3.26\ 10^{-4}$	$3.47\ 10^{-4}$	$3.19\ 10^{-4}$	$3.51\ 10^{-4}$	$3.05\ 10^{-4}$	$4.8\ 10^{-4}$

4.6.9 Résumé des évaluations quantitatives

Evaluation séparée des options de conception retenues au stade 2009 :

- Les évolutions de certaines options de conception (qui intègrent des éléments de réduction du caractère borgne du stockage) modifient le fonctionnement hydraulique du fait de la possibilité d'action des gradients hydrauliques horizontaux.
- Malgré cela, la forte prédominance de la voie Callovo-Oxfordien n'est pas remise en cause, même dans le cas d'une situation de défaillance de tous les scellements, et pour les configurations hydrauliques les plus défavorables, ce qui apporte une confirmation de la robustesse d'ensemble des principes de stockage.
- La confirmation de la prédominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien permet de renforcer la validité des indicateurs d'impact utilisés en 2005 puisque les principes de fonctionnement de la voie diffusive verticale (dominante) ne sont pas changés (épaisseur des gardes minimales, « densité » du stockage). Il se confirme par ailleurs que les performances de confinement du Callovo-Oxfordien déterminées sur la base de jeux de paramètres mesurés sur cinq plateformes de forage réparties sur la zone de transposition sont supérieures à celles considérées en 2005.

Evaluations combinée des options :

- La modélisation de l'ensemble du stockage qui n'avait pas été réalisée en 2005 est une avancée qui permet de comprendre plus finement les influences hydrauliques réciproques de chacun des éléments qui le constituent (sans exagération artificielle du caractère pénalisant) et donne une vision plus réaliste du stockage.
- Les indicateurs intermédiaires calculés par ce modèle « combinatoire » sont tout à fait cohérents avec ceux qui avaient été calculés en 2005, séparément zone par zone, et sans tenir compte de la géométrie réelle des connexions. Ceci renforce globalement la confiance accordée aux modélisations et aux évaluations de performance.
- Cette modélisation est une étape importante vers les modélisations « géo-localisée » (en XY mais aussi en Z compte tenu du pendage) qui seront conduites au sein de la ZIRA en vue de la DAC.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Documents réglementaires

Arrêté du 10 août 1984, relatif à la qualité de la conception, de la construction et de l'exploitation des installations nucléaires de base

Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées

Arrêté du 29 mai 2000 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2925 « ateliers de charge d'accumulateurs »

Arrêté du 30 décembre 2004 relatif à la carte individuelle de suivi médical et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants

Arrêté du 31/01/2006 modifiant l'arrêté du 31/12/99 du ministre de l'économie, des finances et de l'industrie et de la ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement fixant la réglementation technique générale destinée à prévenir et limiter les nuisances et les risques externes résultant de l'exploitation des installations nucléaires de base

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

Décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives

Décret n°2008-357 du 16 avril 2008 pris pour l'application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

Circulaire du 8 février 2007 relative aux sites et sols pollués- Modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués

DTU P 06-002 : Règles NV 65 - Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes

Guide ASN – Guide relatif à l'application de l'arrêté du 31/12/1999 – Thème Incendie – ASN/GUIDE/7/01

Guide de Ventilation des Installations Nucléaires CETREVE (07/87)

Guide technique ANDRA, AREVA, CEA, EDF – Guide inter-exploitants d'application du thème incendie de l'arrêté du 31/12/99 modifié diffusé par lettre référencée ANDRA DG/07-0143 du 28 juin 2007

Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire

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

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

NF EN 62305 (2006) – Protection contre la foudre

Norme ISO Internationale 17873 (première édition 2004-10-15) - critères pour la conception et l'exploitation des systèmes de ventilation des installations nucléaires autres que les réacteurs nucléaires

RFS I.1.a du 7 octobre 1992 relative à la prise en compte de risque lié aux chutes d'avion pour les installations nucléaires de base autres que les réacteurs à l'exception des installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs

RFS I.1.b du 7 octobre 1992 relative aux installations nucléaires de base autre que les réacteurs, à l'exception des installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs - Prise en compte des risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication

RFS I.2.e du 12 avril 1984 relative à la prise en compte du risque d'inondation d'origine externe

RFS I.3.c du 18 octobre 1984 relative au risque de criticité

RFS I.4.a du 28 février 1985 relative à la protection contre l'incendie

RFS II.2 du 20 décembre 1991 relative aux systèmes de ventilation des installations nucléaires de base autres que les réacteurs nucléaires à l'exception des installations souterraines des ouvrages de stockage des déchets en couches géologiques profondes

RFS n° 2001-01 du 30 mai 2006 relative aux installations nucléaires de base - Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface (Installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme de déchets radioactifs)

Documents émis dans le cadre du Dossier 2005 et de son instruction

AEN (2006) Safety of geological disposal of high-level and long-lived radioactive waste in France. An international Peer Review of the Dossier 2005 Argile" concerning disposal in the Callovo-Oxfordian formation

Andra (2005a) Dossier 2005 Argile – Synthèse : évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse.

Andra (2005b) Dossier 2005 Argile - Tome Architecture et Gestion du stockage géologique

Andra (2005c) Dossier 2005 Argile - Tome Evaluation de Sûreté

Andra (2005d) Dossier 2005 Argile - Tome Evaluation Phénoménologique

Andra (2005e) Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 – Scénario d'Evolution Normale (S.E.N) – Calculs de référence et de sensibilité - Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats, Rapport Andra n° C.RP.ACSS.05.0005

Andra (2005f) Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 – Scénario d'Evolution Altéré (S.E.A) « fonctionnement très dégradé » - Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats, Rapport Andra n° C.RP.ACSS.05.0012

Autorité de Sûreté Nucléaire (2006) Synthèse de l'avis de l'autorité de sûreté nucléaire sur les recherches relatives à la gestion des déchets de haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991

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

Commission Nationale du Débat Public (CNDP 2006) Commission Particulière du Débat Public – Gestion des déchets radioactifs. Bilan du débat public sur les options générales en matière de gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue

Autres documents

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

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

Andra (2009c) Options de conception du stockage en formation géologique profonde Rapport C.NSY.ASTE.08.0429

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

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

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

Andra (2009g) Demande de renouvellement de l'autorisation d'exploitation du Laboratoire souterrain Pièce 2 : Mémoire C.NSY.ADP.09.0027

Andra (2009h) Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 – Centre de Meuse/Haute-Marne, Rapport Andra n°D.RP.ALS.08.1356/B

Andra (2009i) Modèle conceptuel du milieu géologique site de Meuse/Haute-Marne, Rapport Andra n°C.RP.ADS.09.0005

Andra (2009j) Inventaire national des matières et des déchets radioactifs – Edition 2009. http://www.andra.fr/pages/fr/menu1/les-dechets-radioactifs/o--sont-les-dechets-radioactifs---10.html

Andra (2009k) Référentiel du site Meuse/Haute Marne, Rapport Andra n°C.RP.ADS.09.0007A

Andra (2009l) Projet HAVL – Analyse préliminaire du risque de chute d'avion : Installations de surface HA-MAVL, Rapport Andra n°C.NT.ASSN.09.0047

AIEA (2003) BIOMASS-Reference Biospheres for solid radioactive waste disposal, report of BIOMASS Theme 1 of the "Biosphere Modelling and Assessment Programme" International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria), IAEA-BIOMASS-6, July 2003

OCDE/AEN (2004) Post-closure safety case for geological repositories

Dossier de Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation (DAIE) du Laboratoire souterraine de Meuse Haute Marne

Pepin, G. (2008) Projet HA-VL – Etude de sensibilité de la performance du stockage au couple (épaisseur, gradient de charge) du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition, Rapport Andra n° C.NT.AEAP.08.0095/A

UNE VISITE GRATUITE ?

APPELEZ LE

N° Vert 0 805 107 907

APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

ANDRA

La maîtrise des déchets radioactifs

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

392 • Septembre 2010 • 50 exemplaires • DCOM-10-0107 • Conception graphique et réalisation : Pascal Lemercier • Crédits photos : Polynotes
Impression certifiée Imprim'Vert avec des encres végétales sur un papier partiellement recyclé, certifié FSC • Gratuit - Ne peut être vendu