

DOCUMENT TECHNIQUE

DOSSIER D'OPTIONS DE SÛRETÉ PARTIE APRÈS FERMETURE (DOS-AF)

Identification

CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062/A

08/04/2016

Page : 1/467

Sommaire

Tables des illustrations	10
VOLUME I - Contexte - Objectifs - Strategie de sûreté	23
1. Contexte et objet	25
<i>1.1 Le besoin</i>	26
<i>1.2 Le projet Cigéo - un processus par étapes</i>	27
1.2.1 Des itérations de sûreté dès le début du projet	27
1.2.2 Repères chronologiques	30
<i>1.3 Le périmètre et objet du document</i>	31
1.3.1 Périmètre	31
1.3.2 Objet	32
2. Présentation générale de Cigéo	35
<i>2.1 Le centre de stockage après fermeture</i>	36
<i>2.2 L'implantation de Cigéo</i>	38
<i>2.3 Le phasage de Cigéo après sa fermeture définitive et les échelles de temps</i>	40
3. Cadre réglementaire et référentiels	43
<i>3.1 La réglementation applicable au projet Cigéo</i>	44
<i>3.2 Les guides et référentiels techniques</i>	44
3.2.1 Guides et règles fondamentales de sûreté : cas spécifique du Guide ASN-2008	44
3.2.2 Référentiel complémentaire Andra	44
<i>3.3 Les standards et pratiques internationaux</i>	45
<i>3.4 La prise en compte de références nationales et internationales</i>	46
4. Stratégie de sûreté	47
<i>4.1 Les principes fondamentaux</i>	48
<i>4.2 Les Fonctions de sûreté après fermeture, principes généraux de conception et exigences applicables</i>	49
4.2.1 Les fonctions principales	49
4.2.2 La déclinaison de la fonction « limiter le transfert jusqu'à la biosphère »	50
4.2.3 Les principes généraux de conception	53
4.2.4 Les exigences applicables à la conception de Cigéo	55
<i>4.3 Les objectifs de protection</i>	55
4.3.1 L'objectif de protection radiologique	55
4.3.2 L'objectif de protection vis-à-vis des toxiques chimiques	56
<i>4.4 La démarche globale</i>	56
4.4.1 L'approche coordonnée entre sûreté en exploitation et sûreté après fermeture	56
4.4.2 L'application du principe de défense en profondeur à la sûreté après fermeture	58
5. L'évaluation de sûreté	59

5.1	<i>Les objectifs visés</i>	60
5.2	<i>La cohérence avec les pratiques internationales</i>	60
5.3	<i>Les étapes de l'évaluation</i>	61
5.4	<i>L'analyse qualitative des incertitudes et risques</i>	61
5.5	<i>Les scénarios</i>	63
5.5.1	Le scénario d'évolution normale	63
5.5.2	Les scénarios d'évolution altérée et « <i>What-if</i> »	63
5.5.3	Les scénarios d'intrusion humaine involontaire	64
5.6	<i>L'évaluation quantitative des scénarios</i>	65
5.6.1	Le schéma général de mise en œuvre des calculs	65
5.6.2	Les indicateurs de fonctionnement du système de stockage	68
5.6.3	L'indicateur permettant d'évaluer l'impact sur l'homme	69
6.	Management de la sûreté	71
6.1	<i>Le management de la sûreté dans le système de management intégré</i>	72
6.2	<i>La maîtrise des exigences</i>	72
6.3	<i>Le respect des exigences applicables</i>	73
6.4	<i>La maîtrise de la conception et de la réalisation</i>	73
6.4.1	La maîtrise des prestataires et interactions avec les partenaires scientifiques	73
6.4.2	La maîtrise des études liées au caractère innovant de Cigéo - l'échelle TRL	73
6.5	<i>La maîtrise des outils</i>	74
6.5.1	Un bouquet d'outils capable de mener des simulations numériques multi-physiques sur de grandes échelles de temps et d'espace	74
6.5.2	Une plate-forme de simulation simplifiée à l'intérieur d'un « bouquet » d'outils	74
6.5.3	Une chaîne de simulation intégrée	75
6.6	<i>La maîtrise des données d'entrée</i>	76
6.6.1	La chaîne de traitement des données : de la donnée brute à la donnée intégrée	76
6.6.2	Les processus de choix de données et de connaissances scientifiques pour les évaluations de sûreté	77
6.7	<i>Le processus de revues internes et externes</i>	78
	VOLUME II – Description du système de stockage	79
1.	Les caractéristiques du site d'implantation	81
1.1	<i>Un contexte géologique simple et bien connu au travers d'importants travaux de reconnaissance</i>	82
1.1.1	Des campagnes d'investigations géologiques successives et des travaux scientifiques pour caractériser le site	82
1.1.2	L'histoire géologique du secteur de Meuse Haute-Marne	82
1.2	<i>La justification des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien et de la localisation de Cigéo</i>	86
1.2.1	Une formation de grande épaisseur et localisée à une profondeur importante	86
1.2.2	Une formation de grande continuité latérale	88
1.2.3	Une formation exempte d'hétérogénéités structurales	90
1.2.4	Des propriétés qui favorisent l'immobilisation et la rétention des radionucléides	90
1.2.5	Des caractéristiques hydrauliques qui limitent les circulations d'eau	91
1.2.6	Des propriétés diffusives qui limitent la migration des radionucléides	93

1.2.7	Des propriétés mécaniques propres suivant l'unité lithostratigraphiques : l'absence d'endommagement marqué et/ou une cicatrisation hydraulique de l'endommagement	95
1.3	<i>Une représentation maîtrisée des écoulements des eaux dans les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien</i>	97
1.3.1	Le système aquifère superficiel des calcaires du Barrois	98
1.3.2	L'Oxfordien calcaire	99
1.3.3	Le Dogger	100
1.4	<i>Une géodynamique interne limitée et lente</i>	101
1.5	<i>Une formation stable dans un environnement qui évolue peu sur le prochain million d'années</i>	102
1.5.1	Une évolution géodynamique globalement limitée sur le prochain million d'années	103
1.5.2	A l'aplomb de la ZIRA, un Callovo-Oxfordien non affecté par les modifications qui se produiront en surface sur le prochain million d'années	104
1.5.3	Des écoulements dans les aquifères encadrant le Callovo-Oxfordien peu modifiés sur le prochain million d'années	106
1.6	<i>L'absence de stérilisation de ressources naturelles</i>	108
1.6.1	Les ressources minérales et en hydrocarbures	108
1.6.2	Les ressources géothermales	108
1.6.3	Les ressources en eaux	108
1.7	<i>D'autres caractéristiques du site intervenant dans l'évaluation de sûreté</i>	109
1.7.1	Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien	109
1.7.2	La quantification de l'aléa sismique	112
1.7.3	L'évolution des biosphères	113
2.	Les colis de déchets HA et MA-VL stockés	115
2.1	<i>La provenance et la nature des familles de déchets</i>	116
2.1.1	Provenance	116
2.1.2	Hypothèses retenues pour l'inventaire des déchets	117
2.1.3	Familles de colis de déchets MA-VL et HA	117
2.2	<i>L'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture</i>	118
2.2.1	Démarche de construction de l'inventaire et de traitement des incertitudes	119
2.2.2	Inventaire radiologique des colis de déchets	121
2.2.3	Inventaire en toxiques chimiques	126
2.3	<i>Les caractéristiques des colis primaires de déchets intervenant dans les fonctions de sûreté de Cigéo</i>	126
2.3.1	Les colis primaires de déchets HA	126
2.3.2	Les colis primaires de déchets MA-VL	127
2.3.3	Les modèles de relâchement retenus pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture	127
2.4	<i>Les conteneurs de stockage HA</i>	134
2.4.1	Contributions des conteneurs de stockage HA aux fonctions de sûreté	134
2.4.2	Options de conception retenues pour le conteneur de stockage HA	135
2.4.3	Exigences vis-à-vis du risque de corrosion sous contrainte	137
2.4.4	Exigences vis-à-vis du risque de corrosion radiolytique	137
2.4.5	Exigences vis-à-vis des autres phénomènes de corrosion	138
2.4.6	Comportement mécanique et évaluation de durabilité du conteneur	138
2.5	<i>Les conteneurs de stockage MA-VL</i>	139
2.5.1	Options de conception des conteneurs de stockage MA-VL	139

2.5.2	Contributions des conteneurs de stockage MA-VL aux fonctions de sûreté après fermeture	139
3.	L'installation Cigéo après fermeture	141
3.1	<i>L'architecture d'ensemble</i>	142
3.1.1	Options de conception pour « s'opposer à la circulation d'eau »	143
3.1.2	Options de conception pour « atténuer et retarder la migration »	144
3.1.3	Maîtrise des perturbations	147
3.2	<i>Les quartiers et les alvéoles de stockage de déchets HA</i>	149
3.2.1	Options de conception, contribution aux fonctions de sûreté après fermeture	150
3.2.2	Retour d'expérience	155
3.2.3	Impact de la température sur le retard et l'atténuation de la migration des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien	156
3.2.4	Exigences particulières vis-à-vis du chemisage	157
3.2.5	Exigences et performances particulières vis-à-vis du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage	158
3.2.6	Maîtrise des interactions fer/argilites	159
3.3	<i>Le quartier et les alvéoles de stockage de colis de déchets MA-VL</i>	160
3.3.1	Options de conception	160
3.3.2	Contribution aux fonctions de sûreté après fermeture	162
3.3.3	Retour d'expérience	168
3.3.4	Maîtrise des interactions physico-chimiques	169
3.4	<i>Les ouvrages de fermeture</i>	172
3.4.1	Fonctions de sûreté et options de conception des scellements	172
3.4.2	Retour d'expérience sur les performances des scellements	179
3.4.3	Bouchons argileux de fermeture des têtes d'alvéoles HA	192
3.4.4	Remblais	193
VOLUME III	– Evaluation de sûreté	195
1.	La maîtrise des risques et des incertitudes	197
1.1	<i>Introduction</i>	198
1.2	<i>L'identification et la gestion des incertitudes sur les données d'entrées : les colis stockés et le milieu géologique</i>	199
1.2.1	L'inventaire radiologique et sa distribution dans l'architecture à terminaison	199
1.2.2	Les modèles de relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques	203
1.2.3	Le Callovo-Oxfordien	203
1.2.4	Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien	204
1.2.5	L'environnement de surface : la biosphère	205
1.3	<i>Les caractéristiques intrinsèques des composants ouvragés du stockage</i>	209
1.3.1	Les caractéristiques des ouvrages à base d'argile	209
1.3.2	Les caractéristiques intrinsèques des ouvrages à base de bétons	210
1.3.3	Les caractéristiques des matériaux de remblaiement des ouvrages	212
1.4	<i>Les phénomènes régissant l'évolution interne du système de stockage</i>	213
1.4.1	La perturbation mécanique des argilites autour des ouvrages de stockage	213
1.4.2	Le transitoire thermique	218
1.4.3	Le transitoire hydraulique-gaz	219
1.4.4	Les perturbations chimiques	220
1.5	<i>Les incertitudes technologiques</i>	228
1.5.1	Les incertitudes sur les technologies mises en œuvre dans les alvéoles HA	228
1.5.2	Les incertitudes sur les technologies mises en œuvre dans les galeries	229
1.6	<i>Les risques et incertitudes relatifs aux événements futurs d'origine externe</i>	230

1.6.1	Évolution climatique	230
1.6.2	Évolution géodynamique	230
1.6.3	Risque de criticité dans le stockage après fermeture	231
1.7	<i>La liste des scénarios retenus</i>	231
2.	Le scénario d'évolution normale	235
2.1	<i>Description et conceptualisation du scénario d'évolution normale</i>	236
2.1.1	Objectifs et cas de calculs retenus	236
2.1.2	L'architecture de stockage retenue	237
2.1.3	La représentation du stockage dans le Callovo-Oxfordien	237
2.1.4	L'inventaire radiologique	238
2.1.5	Le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques	239
2.1.6	Le Callovo-Oxfordien	240
2.1.7	L'endommagement mécanique des argilites à la fermeture du stockage	242
2.1.8	Le transitoire thermique	245
2.1.9	Les perturbations chimiques	246
2.1.10	Le quartier MA-VL	251
2.1.11	Le quartier HA	254
2.1.12	Les ouvrages de fermeture des galeries	255
2.1.13	Les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond	257
2.1.14	Le remblaiement des ouvrages de liaison surface-fond	259
2.1.15	Synthèse des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés	261
2.1.16	Les formations encaissantes	261
2.1.17	La biosphère	264
2.2	<i>Traitement du SEN</i>	266
2.2.1	Définition des voies de transfert	266
2.2.2	Les indicateurs retenus	268
2.3	<i>Résultats du SEN</i>	268
2.3.1	Résultats du SEN vis-à-vis de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau »	268
2.3.2	Résultats du SEN vis-à-vis de la fonction la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »	269
2.3.3	Résultats du SEN vis-à-vis de la fonction la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »	272
2.4	<i>Enseignements du SEN</i>	300
2.4.1	Analyse des choix structurants du SEN	300
2.4.2	Analyse des fonctions de sûreté après-fermeture	300
2.4.3	Analyse des impacts radiologiques	303
3.	Les scénarios d'évolutions altérées	305
3.1	<i>Les SEA de dysfonctionnement des scellements</i>	306
3.1.1	Rappel des scénarios retenus	306
3.1.2	Description des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface	307
3.1.3	Traitement des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface	312
3.1.4	Résultats des SEA de dysfonctionnement des scellements	312
3.1.5	Enseignements des SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture	324
3.2	<i>Les SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA</i>	326
3.2.1	Rappel des scénarios retenus	326
3.2.2	Description du scénario de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA	326
3.2.3	Traitement du SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	327
3.2.4	Résultats du SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	328
3.2.5	Enseignements du SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	331

4.	Les scénarios d'intrusion humaine involontaire	333
4.1	<i>Identification des scénarios d'intrusion humaine involontaire</i>	334
4.1.1	Démarche méthodologique	334
4.1.2	Revue des « situations de forage »	334
4.1.3	Sélection des scénarios retenus	338
4.2	<i>Le SEA de forage exploratoire au Dogger</i>	341
4.2.1	Traitement du scénario	341
4.2.2	Résultats	344
4.2.3	Enseignements	347
4.3	<i>Le scénario de prélèvement de carottes</i>	347
4.3.1	Traitement du scénario	347
4.3.2	Résultats	350
4.3.3	Enseignements	352
4.4	<i>Le scénario « What-if » d'intrusion humaine</i>	352
4.4.1	Traitement du scénario	352
4.4.2	Résultats	354
4.4.3	Enseignements	358
5.	Les scénarios What-if	359
5.1	<i>Les scénarios « What-if » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture</i>	360
5.1.1	Rappel des scénarios retenus	360
5.1.2	Description et conceptualisation des scénarios What-if de « Dysfonctionnement des ouvrages de fermeture »	361
5.1.3	Traitement des « What-if » de dysfonctionnement des scellements	364
5.1.4	Résultats des « What-if » de dysfonctionnement des scellements	364
5.1.5	Enseignements des scénarios « What-if » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture	376
5.2	<i>Les scénarios « What-if » de dysfonctionnement des conteneurs de stockage</i>	378
5.2.1	Rappel des scénarios retenus	378
5.2.2	Description et conceptualisation du scénario « What-if » de défaillance de tous les conteneurs de stockage HA (HA0, HA1/HA2)	378
5.2.3	Traitement du scénario « What-if » de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	378
5.2.4	Résultats du scénario « What-if » de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	379
5.2.5	Enseignements	384
VOLUME IV - Enseignements - Composants importants - Activités mises en place dès la conception		385
1.	Enseignements au stade de l'APS et Prochaines itérations de sûreté	387
1.1	<i>Les composants importants pour la robustesse du système de stockage après fermeture au stade de l'APS</i>	388
1.1.1	Le Callovo-Oxfordien, le pilier de la sûreté après fermeture du système de stockage	389
1.1.2	Les dispositions d'architecture et des composants ouvragés jouant un rôle complémentaire	390
1.1.3	Des composants ouvragés intervenant de façon plus limitée vis-à-vis des fonctions du système de stockage	392
1.2	<i>La robustesse du système de stockage après fermeture est un élément important pour l'adaptabilité du projet Cigéo</i>	393

1.3	<i>Les enjeux de la prochaine itération de sûreté après fermeture pendant l'APD et support à la DAC</i>	393
1.4	<i>L'intégration progressive des évolutions de conception et des pistes d'optimisation dans le développement du projet Cigéo</i>	394
2.	Les activités importantes de la conception à la fermeture du stockage	397
2.1	<i>Activités de contrôles et de surveillance pendant la construction jusqu'au démarrage de la phase industrielle pilote</i>	398
2.2	<i>Activités pendant la phase industrielle pilote puis en exploitation courante</i>	399
2.2.1	Le cadre général	399
2.2.2	Les démonstrateurs d'ouvrages de fermeture	400
2.2.3	Les alvéoles témoins	401
2.2.4	Le contrôle et la surveillance et de l'architecture	402
2.2.5	Le contrôle et la surveillance des colis	402
2.2.6	Le bilan prévisionnel	402
2.3	<i>Contrôle et surveillance après la fermeture définitive</i>	404
2.4	<i>L'observation : un complément à la surveillance de l'installation</i>	404
	Annexes	405
	Annexes du volume I	407
	Annexes du volume II	419
	Annexes du volume III	448
	Annexes du volume IV	461
	Références bibliographiques	465

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1.2-1 :	Illustration du processus itératif	27
Figure 1.2-2 :	Le développement du projet Cigéo un processus itératif en matière de sûreté par étapes depuis 1991	29
Figure 2.1-1 :	Illustrations de colis de déchets fabriqués par AREVA ; à gauche colis de déchets vitrifiés HA, à droite colis de déchets de maintenance MA-VL	36
Figure 2.1-2 :	Illustration de l'installation souterraine de Cigéo une fois fermée définitivement (sous réserve de son autorisation par une loi)	37
Figure 2.2-1 :	Zones d'implantation de Cigéo : zone « puits » et zone « descenderie » et ZIRA	40
Figure 2.3-1 :	Schéma des principales phases temporelles de Cigéo	40
Figure 4.2-1 :	Arborescence des fonctions permettant de limiter le transfert des substances radioactives (et toxiques chimiques) par voie aqueuse	53
Figure 4.4-1 :	Schéma illustrant l'approche coordonnée entre la sûreté en exploitation et après fermeture	57
Figure 5.5-1 :	Illustration schématique des différentes étapes de l'analyse qualitative de sûreté et du lien avec la définition des scénarios de sûreté	64
Figure 5.6-1 :	Enchaînement des modèles en hydraulique et en transfert de solutés	66
Figure 5.6-2 :	Principe de l'architecture de calcul par compartiments emboîtés	67
Figure 5.6-3 :	Schéma illustrant l'utilisation d'indicateurs autres que la dose en s'appuyant sur la période radioactive du radionucléide et son comportement en solution	69
Figure 5.6-4 :	Schéma illustrant les différentes étapes de choix et de description d'une biosphère	70
Figure 6.5-1 :	Architecture de la plate-forme Cassandra	75
Figure 6.5-2 :	Chaîne de calcul intégrant les différents outils de simulation utilisée pour les évaluations de sûreté après fermeture	76
Figure 6.6-1 :	Schéma de la chaîne de traitement des données scientifiques depuis l'acquisition jusqu'à l'utilisation	77
Figure 1.1-1 :	Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse / Haute-Marne	83
Figure 1.1-2 :	Carte topographique du territoire autour de la ZIRA	85
Figure 1.2-1 :	Epaisseur (m) du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA (comptée entre les surfaces SNC et LS0)	87
Figure 1.2-2 :	Profondeur (m) du milieu géométrique du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA (comptée par rapport à la topographie)	87
Figure 1.2-3 :	Illustration de l'homogénéité latérale de l'organisation verticale du Callovo-Oxfordien sur le secteur étudié (enregistrement diagraphique Gamma Ray)	88
Figure 1.2-4 :	Principales unités géologiques du Callovo-Oxfordien : unité argileuse (UA), unité de transition (UT) et unité silto-carbonatée (USC). Les limites géologiques du Callovo-Oxfordien sont données par les surfaces LS0 et SNC	89
Figure 1.2-5 :	Lignes d'iso-gradient vertical de charge hydraulique à l'échelle du Callovo-Oxfordien	92
Figure 1.2-6 :	Cartographie des temps de transfert de ^{238}U pour un stockage implanté au milieu du Callovo-Oxfordien	94
Figure 1.2-7 :	Cartographie des temps de transfert de ^{129}I pour un stockage implanté au milieu du Callovo-Oxfordien	95
Figure 1.2-8 :	Représentation de la fracturation induite autour des ouvrages suivant leurs orientations par rapport à la contrainte horizontale majeure (a)	

	Galerie orientée suivant la contrainte horizontale mineure (b) Galerie orientée suivant la contrainte horizontale majeure	96
Figure 1.2-9 :	Illustration du colmatage des fractures dans l'UA, à partir d'une photographie MEB (échelle millimétrique)	97
Figure 1.3-1 :	Représentation conceptuelle des écoulements dans les différentes formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne	98
Figure 1.3-2 :	Structure verticale du système aquifère de l'Oxfordien calcaire. Les couleurs correspondent aux différents niveaux poreux (violet, jaune, marron). La présence des marnes est représentée en orange et rouge	99
Figure 1.3-3 :	Piézométries simulées des deux nappes de l'Oxfordien calcaire (nappe de l'Oxfordien supérieur à gauche) -Piézométries latérales de l'Oxfordien calcaire moyen et supérieur	100
Figure 1.3-4 :	Piézométries simulées dans le Dogger	101
Figure 1.4-1 :	Zonage sismique en France (gauche) et cartographie des séismes enregistrés entre 1980 et 2010 (droite)	102
Figure 1.5-1 :	Evolution de la position de l'iso-gradient de charge nul au travers de la formation du Callovo-Oxfordien au cours du prochain million d'années selon l'évolution géodynamique	105
Figure 1.5-2 :	Modélisation des trajets de particules émises dans l'Oxfordien carbonaté à l'aplomb de la zone d'implantation et de recherche approfondie, à t=0 Ka (en jaune) et à t= 400 Ka (en vert) donc avec prise en compte de l'évolution géodynamique sur le prochain million d'années	106
Figure 1.5-3 :	Modélisation des trajets de particules émises dans le Dogger à l'aplomb de la zone d'implantation et de recherche approfondie, à t=0 Ka (en jaune) et à t= 400 Ka (en vert) donc avec prise en compte de l'évolution géodynamique sur le prochain million d'années	107
Figure 1.7-1 :	Carte de l'épaisseur (m) des calcaires du Barrois et des formations plus récentes (sur la zone d'implantation et de recherche approfondie, cette épaisseur correspond à l'épaisseur des calcaires du Barrois)	110
Figure 1.7-2 :	Spectre SMPP – accélération (composante horizontale)	113
Figure 2.2-1 :	Synoptique de construction de l'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation de sûreté après fermeture de Cigéo	119
Figure 2.2-2 :	Evolution de l'activité des 10 radionucléides présentant les plus fortes activités maximales sur 1 million d'années après fermeture de Cigéo	122
Figure 2.2-3 :	Illustration de l'évolution de l'activité des 10 radionucléides présentant les plus fortes activités maximales sur 1 Ma pour les colis HA	123
Figure 2.2-4 :	Inventaire radiologique de référence des déchets HA fortement exothermiques. Evolution de l'activité des 10 radionucléides présentant les plus fortes activités maximales sur 1 million d'années	125
Figure 2.3-1 :	Logigramme illustrant la stratégie de choix des modèles de relâchement des radionucléides pour l'évaluation de sûreté	128
Figure 2.3-2 :	Logigramme illustrant la méthodologie de choix des paramètres du modèle de relâchement retenu	129
Figure 2.4-1 :	Illustration d'un colis de stockage de déchets vitrifiés de type AVM biplace	136
Figure 2.4-2 :	Illustration d'un colis de stockage de déchets vitrifiés de type R7-T7	137
Figure 2.4-3 :	Illustration du risque de corrosion par crevasse en cas de contact du conteneur et du chemisage (à gauche) et de la prévention de ce risque par l'interposition de patins inertes (à droite)	138
Figure 3.1-1 :	Illustration au stade de l'APS de l'architecture souterraine au moment de la fermeture définitive de Cigéo.	143
Figure 3.1-2 :	Positionnement de l'installation souterraine à terminaison et gradients de charge hydraulique observés dans la ZIRA	144
Figure 3.2-1 :	Schéma de principe de l'alvéole HA (cas des déchets HA1/HA2)	150
Figure 3.2-2 :	illustration d'intercalaire HA pour mise en alvéole HA1/HA2	153
Figure 3.2-3 :	Evolutions temporelles de la température en différents points dans et autour de l'alvéole HA2 le plus chaud (l'évolution de la température dans les argilites en paroi est donnée par la courbe jaune)	154

Figure 3.2-4 :	Alvéole HA - Démonstrateurs au Laboratoire souterrain	156
Figure 3.2-5 :	Représentation schématique de l'impact des constituants du matériau sur le pH final. La hauteur du rectangle donne un ordre de grandeur de la proportion du composant dans le matériau	158
Figure 3.3-1 :	Illustration d'un alvéole MA-VL après fermeture -	160
Figure 3.3-2 :	Illustration d'arrangement de colis de stockage dans un alvéole MA-VL	161
Figure 3.3-3 :	Illustration du quartier MA-VL à terminaison	162
Figure 3.3-4 :	Evolution de la température dans un alvéole de déchets non exothermiques (noir) en fonction de la localisation ou du regroupement d'alvéoles de déchets MA-VL faiblement exothermiques à son voisinage	164
Figure 3.3-5 :	Epaisseurs d'argilites pour un stockage dont le plan médian serait positionné sur la surface du milieu géométrique du Callovo-Oxfordien	165
Figure 3.3-6 :	Effet de l'orientation des ouvrages souterrains sur l'EDZ dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien	166
Figure 3.3-7 :	Estimation des extensions horizontale et verticale de la zone de roche foisonnée (ZF) et de la zone de roche fracturée connectée (ZFC) à partir de la paroi excavée, en fonction du taux de vide	166
Figure 3.3-8 :	Creusement de la chambre de montage du tunnelier pour l'essai GVA2 au Laboratoire souterrain (diamètre excavé de 9,1 m)	169
Figure 3.3-9 :	Profils temporels de la force ionique au droit d'un alvéole de stockage MA-VL de colis de déchets salins	170
Figure 3.3-10 :	Effet osmotique lié à la présence des sels issus des déchets de catégorie MA-VL1 sur l'hygrométrie d'un alvéole au cours du premier millénaire après mise en place	171
Figure 3.4-1 :	Schémas de principe des scellements inclinés, verticaux, horizontaux	173
Figure 3.4-2 :	Les « composants » entrant dans la performance hydraulique des scellements	179
Figure 3.4-3 :	Principe de conception de l'essai FSS	180
Figure 3.4-4 :	Essai de réalisation de scellement	180
Figure 3.4-5 :	Influence de la perméabilité du noyau argileux sur la perméabilité en grand des scellements	181
Figure 3.4-6 :	Contrainte de compression effective dans la ZFC en fonction du temps et pour différentes pressions de gonflement du noyau argileux	183
Figure 3.4-7 :	Perméabilité équivalente du composant entre le noyau et les argilites en fonction du maintien/dépose du revêtement	184
Figure 3.4-8 :	Evolution des conductivités hydrauliques mesurées dans l'expérimentation CDZ depuis le démarrage de la resaturation pour les 8 intervalles testés périodiquement	188
Figure 3.4-9 :	Plans schématiques de concepts de massif d'appui actuellement à l'étude : (a) à un ou plusieurs redans ; (b) à un redan ancré dans les argilites	189
Figure 3.4-10 :	Schémas de principe de la technique de mise en place du massif d'appui par béton auto-plaçant	190
Figure 3.4-11 :	Schémas de principe de la technique de mise en place du massif d'appui par projection de béton	190
Figure 1.2-1 :	Représentation schématique d'une distribution de colis MA-VL « indépendante des chroniques de livraisons prévisionnelles ».	200
Figure 1.2-2 :	Configuration de répartition de l'inventaire radiologique retenue au sein du quartier MA-VL pour les évaluations quantitatives du scénario d'évolution normale et de dysfonctionnement	201
Figure 1.2-3 :	Distribution des familles de colis retenue au sein du quartier HA1-HA2 et données géométriques retenues à ce stade en hypothèse pour les calculs	202
Figure 1.2-4 :	Distribution des familles de colis au sein du quartier HA0 et données géométriques retenues à ce stade en hypothèse pour les calculs	203
Figure 2.1-1 :	Illustration schématique du positionnement des alvéoles MA-VL et alvéoles HA de stockage dans la formation hôte, en référence du SEN. Prise en compte de la géométrie réelle du Callovo-Oxfordien en termes d'épaisseur et de profondeur	237

Figure 2.1-2 :	Illustration schématique du positionnement des alvéoles MA-VL et alvéoles HA de stockage dans la Callovo-Oxfordien, en situation enveloppe (prise en compte de l'épaisseur de garde minimale fixée par les exigences en partie supérieure (50 mètres))	238
Figure 2.1-3 :	Schéma conceptuel des zones de fracturation connectée et discrète et de la zone de foisonnement au droit des alvéoles MA_VL	243
Figure 2.1-4 :	Représentation schématique de la zone affectée par le transitoire thermique autour d'un alvéole HA	245
Figure 2.1-5 :	Illustration schématique de l'influence de la perturbation alcaline à l'interface argilites/béton classique sur les caractéristiques de transport et rétention (exemple au droit des alvéoles MA-VL)	247
Figure 2.1-6 :	Illustration schématique de la prise en compte d'un panache de complexants organiques sur les caractéristiques de transport et de rétention au droit d'un alvéole MA-VL (exemple de la situation de référence)	248
Figure 2.1-7 :	Illustration schématique de la prise en compte de la perturbation saline sur les caractéristiques de transport et rétention au droit d'un alvéole MA-VL (exemple de la situation de référence)	249
Figure 2.1-8 :	Conceptualisation des panaches de perturbations chimiques autour de la partie utile des alvéoles MA-VL, en fonction du type de déchets (organiques ou salins)	253
Figure 2.1-9 :	Représentation schématique des alvéoles HA de stockage de colis de déchets HA et des caractéristiques de transport et rétention mobilisées	254
Figure 2.1-10 :	Illustration schématique du choix de représentation des caractéristiques de transport et rétention dans les composants des scellements de galerie	255
Figure 2.1-11 :	Représentation schématique des composants d'une galerie remblayée, en référence et en situation « enveloppe »	257
Figure 2.1-12 :	Illustration schématique du choix de représentation des scellements de puits et des caractéristiques de transport et de rétention (situation de référence à gauche, situation enveloppe à droite)	258
Figure 2.1-13 :	Illustration schématique des choix de représentation des scellements de descenderie et des caractéristiques de transport et de rétention (situations de référence (haut) et enveloppe (bas))	259
Figure 2.1-14 :	Représentation schématique des ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond et des galeries : remblai, revêtement/soutènement, ZFC reminéralisée, argilites endommagées mécaniquement (ZFC et ZFD en situation enveloppe). Prise en compte des propriétés spécifiques des unités USC/UT et UA.	260
Figure 2.1-16 :	Représentation schématique des voies de transfert dans le Callovo-Oxfordien et les encaissants supérieurs et inférieurs	263
Figure 2.1-17 :	Représentation conceptuelle des voies de transfert des radionucléides depuis l'eau potentiellement contaminée de l'exutoire : puits dans l'aquifère du Barrois vers un individu représentatif d'un groupe multi-activités avec irrigation de cultures céréalières	265
Figure 2.1-18 :	Représentation conceptuelle des voies de transfert des radionucléides depuis l'eau potentiellement contaminée de l'exutoire : forage dans le Dogger vers un individu représentatif d'un groupe multi-activités sans irrigation de cultures céréalières	266
Figure 2.2-1 :	Représentation schématique des voies de transfert des colis jusqu'à l'homme	267
Figure 2.3-1 :	SEN-situation de référence : Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier MA-VL	270
Figure 2.3-2 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence -Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier HA	270
Figure 2.3-3 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier MA-VL	271

Figure 2.3-4 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier HA	272
Figure 2.3-5 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence - Historique des débits molaires en iode 129 (en haut) et chlore 36 (en bas) sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien (toit et mur)	273
Figure 2.3-6 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence : historique des débits molaires au toit du Callovo-Oxfordien (les débits molaires sont identiques au mur du Callovo-Oxfordien)	275
Figure 2.3-7 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence - Panaches de concentration uranium 238 et neptunium 237 (en mole/m ³ d'eau) dans les argilites du Callovo-Oxfordien autour d'un alvéole HA à 1 million d'années	276
Figure 2.3-8 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence, quartiers HA (à gauche) et quartier MA-VL (à droite). Historiques des débits molaires en iode 129 (en haut) et chlore 36 (en bas) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien (au toit).	277
Figure 2.3-9 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence quartier MA-VL, alvéoles MA-VL avec scellement ou avec une disposition de fermeture de performance moindre qu'un scellement (« sans scellement »). Historique des débits molaires en iode 129 entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), dans les galeries de liaison, dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	279
Figure 2.3-10 :	Cartographie de l'iso-concentration en iode 129 à 10 ⁻¹¹ mol.L ⁻¹ dans le milieu géologique à 1 million d'années. Trajectoires bleues : du mur du Callovo-Oxfordien à la zone de fracturation diffuse ; trajectoires vertes : du stockage au toit de l'Oxfordien calcaire ; trajectoires jaunes : Callovo-Oxfordien (à l'équilibre avec le Dogger)	280
Figure 2.3-11 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence : Historique des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, dans l'Oxfordien (à 9 km en aval des écoulements), au toit du Kimméridgien et dans le Dogger (au niveau de la zone de fracturation diffuse)	282
Figure 2.3-12 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence : historiques des doses aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude	284
Figure 2.3-13 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - stockage implanté à 50 m du toit (gauche) ou du mur (droite) du Callovo-Oxfordien : Historiques de débits molaires en iode 129 (haut) et chlore 36 (bas) sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	287
Figure 2.3-14 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe : historique des débits molaires au toit du Callovo-Oxfordien (« Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien)	290
Figure 2.3-15 :	Scénario d'évolution normale - Situation « enveloppe » - « stockage haut » implanté avec une garde supérieure de 50 m, quartiers HA (à gauche) et MA-VL (à droite) : historiques de débits molaires en iode 129 et chlore 36 entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), dans les galeries de liaison et dans la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien.	291
Figure 2.3-16 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage haut »), quartier MA-VL, alvéoles MA-VL avec scellement ou avec dispositif de fermeture de performance moindre : historique des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), les galeries de liaison et la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	293

Figure 2.3-17 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe, historique des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le milieu géologique au toit (à gauche) et au mur (à droite) du Callovo-Oxfordien, dans l'Oxfordien (à 9 km en aval de l'emprise du stockage), au toit du Kimméridgien et dans le Dogger (au niveau de la zone de fracturation diffuse)	295
Figure 2.3-18 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe : historiques des doses aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude	298
Figure 2.4-1 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) - quartiers HA et MA-VL, iode 129 : synthèse de la répartition des voies de transfert dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis le colis jusqu'aux exutoires - Bilans normés par rapport à l'inventaire initial	302
Figure 3.1-1 :	Représentation schématique des scellements de puits dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface » (situation enveloppe)	308
Figure 3.1-2 :	Représentation schématique des scellements de galerie dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »	309
Figure 3.1-3 :	Coupe schématique illustrant les différents composants du stockage dans le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » - cas avec ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL de moindre performance	310
Figure 3.1-4 :	Représentation schématique des transferts dans le cadre des SEA de dysfonctionnement des scellements (relâchement et voies de transfert par le Callovo-Oxfordien et les ouvrages)	311
Figure 3.1-5 :	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface, hypothèses de la situation de référence (gauche) et enveloppe (droite) du SEN - Champs de charges hydrauliques (m) dans la zone MA-VL.	314
Figure 3.1-6 :	SEN et les SEA de dysfonctionnement des scellements - situation de référence : représentation des processus de transfert des solutés au sein du stockage et du Callovo-Oxfordien	316
Figure 3.1-7 :	SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface - Historique des débits molaires d'iode 129 entrants dans les galeries d'entrée et de retour d'air et dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	317
Figure 3.1-8 :	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements - Historique des débits molaires d'iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	319
Figure 3.1-9 :	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements (situations de référence et enveloppe) -Historiques de débit molaire de chlore 36 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien -	322
Figure 3.1-10 :	SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface (situations de référence et enveloppe) -Historique des débits molaires des radionucléides dont le débit molaire cumulé au toit du Callovo-Oxfordien excède 10^{-10} moles par an -	323
Figure 3.1-11 :	Historique des doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude - SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » (situation enveloppe)	324
Figure 3.2-1 :	Illustration schématique du SEA défaut de conteneur de stockage HA.	327
Figure 3.2-2 :	SEN et SEA « défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0 ». Hypothèses de la situation de référence du SEN (gauche) et de situation « enveloppe » du SEN (droite) - Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79	328
Figure 3.2-3 :	SEA défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0. Hypothèses de la situation de référence du SEN (gauche) et de situation enveloppe du SEN (droite) -Historique de débit molaire d'iode 129 entrant dans les	

	galeries, dans la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond.	329
Figure 4.1-1 :	Représentation schématique des profondeurs des formations géologiques sur la ZIRA (profondeurs indicatives de la base des formations)	335
Figure 4.1-2 :	Représentation schématique des situations de forage « enveloppes » retenues pour l'évaluation de sûreté après fermeture.	340
Figure 4.2-1 :	Représentation schématique du scénario SIHFor-2b – « Forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle ».	342
Figure 4.2-2 :	Positionnement des forages abandonnés dans les quartiers MA-VL et HA1	343
Figure 4.2-3 :	SEA intrusion humaine – forage dans le quartier MA-VL - Doses à l'exutoire « Dogger » pour une biosphère tempérée	346
Figure 4.3-1 :	Représentation schématique du scénario SIHFor-1 – « Forage d'exploration conduisant à la remontée de carottes contenant des déchets »	348
Figure 4.3-2 :	Représentation schématique d'un carottage dans un quartier HA	348
Figure 4.3-3 :	Représentation schématique d'un carottage dans le quartier MA-VL	349
Figure 4.3-4 :	Evolution sur 1 million d'années de la dose reçue par un foreur exposition externe à une carotte prélevée à 500 ans pour les 5 premières familles HA et MA-VL classées selon le « risque exposition externe ».	352
Figure 4.4-1 :	Représentation schématique du scénario 'What-if' SIHFor-3 – « Forage en vue d'une exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage, en relais avec un forage d'exploitation du Barrois (Tithonien) ».	353
Figure 4.4-2 :	Cartographie des charges hydrauliques dans le quartier MA-VL (plan horizontal traversant les ouvrages de stockage) – Avec et sans ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL – Avec et sans forage intrusif.	355
Figure 4.4-3 :	What-if d'intrusion humaine – forage dans le quartier MA-VL (sans ouvrages de fermeture de d'alvéoles MA-VL) : historiques de doses à l'exutoire « Barrois » pour une biosphère tempérée pour les 43 radionucléides dont la dose maximale excède 10^{-10} Sv/an.	356
Figure 4.4-4 :	Cartographie des charges hydrauliques des quartiers HA1 et HA2 dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage avec et sans forage intrusif.	357
Figure 5.1-1 :	Représentation schématique des scellements de puits dans le What-if « Dysfonctionnement des scellements des LSF » (en situation enveloppe)	361
Figure 5.1-2 :	Représentation schématique des scellements de galerie dans le « What-if » « Dysfonctionnement des scellements de galerie »	362
Figure 5.1-3 :	SEN et « What-if » dysfonctionnement des ouvrages de fermeture, en situation de référence (gauche) et en situation enveloppe (droite) -Champ de charges hydrauliques (m) dans la zone MA-VL.	367
Figure 5.1-4 :	SEN et scénarios What-if de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (situation de référence du SEN) -Processus de transfert des solutés au sein des composants ouvragés et au sein du Callovo-Oxfordien	369
Figure 5.1-5 :	Scénario What-if de dysfonctionnement de tous les scellements - historique des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	370
Figure 5.1-6 :	Scénarios « What-if » de dysfonctionnement des scellements - Historique des débits molaires d'iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et des argilites au toit du Callovo-Oxfordien	373
Figure 5.1-7 :	SEN et scénario « What-if » de dysfonctionnement des scellements (situations de référence et enveloppe) - historique des débits molaires de chlore 36 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien -	374
Figure 5.1-8 :	Scénario « What-if » de dysfonctionnement de tous les scellements (situations de référence et enveloppe) - historique des débits molaires des	

	radionucléides dont le débit molaire cumulé au toit du Callovo-Oxfordien excède 10^{10} moles par an	375
Figure 5.1-9 :	Scénario « What-if » dysfonctionnement de tous les scellements (situation enveloppe) : historique des doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude	376
Figure 5.2-1 :	Situation enveloppe du SEN et scénario « What-if » de défaillance de tous les conteneurs de stockage HA - termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79.	379
Figure 5.2-2 :	Scénario « What-if » de défaillance des conteneurs de stockage HA comparé au SEN : historique des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries, la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond.	380
Figure 5.2-3 :	Scénario défaut de conteneur HA - situation enveloppe, quartiers HA, bilan de la quantité d'iode 129, de chlore 36, de sélénium 79 : (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA)	383
Figure 2.2-1 :	Schéma de la zone d'implantation au stade APS des démonstrateurs d'alvéole HA et de coupure hydraulique non représentés (l'emplacement de la zone au sein de l'installation souterraine est susceptible d'évoluer au cours des études de conception)	401
Figure 2.4-1 :	Compartiment de l'échelle "colis alvéole" : représentation d'un demi-alvéole MA-VL incluant les colis de stockage et les colis primaires	414
Figure 2.4-2 :	Compartiment de l'échelle "milieu géologique" représentant du milieu géologique multicouches et du stockage Cigéo	415
Figure 2.4-3 :	Évolution de la quantité de verre altéré au cours du temps associée à différents régimes de vitesse	437
Figure 2.4-4 :	Evolution de la vitesse d'altération du verre et de la vitesse de relâchement des radionucléides en fonction du temps pour les différentes phases d'altération du verre	440
Figure 2.4-5 :	Relâchement des sels et des radionucléides suite à la reprise d'eau des enrobés bitumineux	443

Tableaux

Tableau 2.2-1 :	Facteurs de marge appliqués aux activités en fonction du niveau de connaissance	120
Tableau 2.2-2 :	Illustration de la répartition à ce stade des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques moyens au prorata du nombre de colis de déchets	121
Tableau 2.2-3 :	Déchets MA-VL : illustration d'activités totales pour une sélection de radionucléides à vie longue	122
Tableau 2.2-4 :	Déchets MA-VL - Evolution de la distribution relative des radionucléides au cours du temps	123
Tableau 2.2-5 :	Déchets HA0 (peu à moyennement exothermiques) : activités totales pour une sélection de radionucléides à vie longue	124
Tableau 2.2-6 :	Déchets HA0 (peu à moyennement exothermiques) - Evolution de la distribution relative des radionucléides au cours du temps	124
Tableau 2.2-7 :	Déchets HA fortement exothermiques HA1 et HA2 - Activités au titre de l'inventaire radiologique de référence pour une sélection de radionucléides à vie longue	125
Tableau 2.2-8 :	Déchets HA fortement exothermiques HA1 et HA2 - Evolution de la distribution relative des radionucléides au cours du temps	126
Tableau 2.3-1 :	Choix des modèles de relâchement des colis de déchets HA vitrifiés	130
Tableau 2.3-2 :	Choix des modèles de relâchement des colis de déchets MA-VL vitrifiés	131
Tableau 2.3-3 :	Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par famille de colis de déchets salins avec matrice bitume	132

Tableau 2.3-4 :	Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par la famille de colis de déchets salins sans matrice bitume	132
Tableau 2.3-5 :	Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par famille de colis de déchets métalliques compactés (sans matrice ciment)	133
Tableau 2.3-6 :	Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par famille de colis de déchets métalliques avec matrice ciment	134
Tableau 2.3-7 :	Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture pour les autres familles de colis de déchets MA-VL	134
Tableau 3.1-1 :	Exigences et dispositions de conception relatives à l'architecture générale de l'installation souterraine.	146
Tableau 3.2-1 :	Fonctions de sûreté, exigences et options de conception associées à l'alvéole HA	154
Tableau 3.3-1 :	Exigences et options de conception associées	167
Tableau 3.4-1 :	Contribution des différents types de scellements dans le Callovo-Oxfordien à la fonction « S'opposer aux circulations d'eau »	174
Tableau 3.4-2 :	Exigences et performances attendues et options de conception pour les scellements verticaux et inclinés	176
Tableau 3.4-3 :	Exigences et performances attendues et options de conception pour les scellements horizontaux	178
Tableau 1.2-1 :	Résultats de la méthodologie de définition de la distribution des familles MA-VL au sein du quartier suivant l'iode 129 pour les dix premières alvéoles de stockage MA-VL (alvéole ouest du quartier MA-VL)	201
Tableau 1.3-1 :	Modalités de gestion des incertitudes relatives aux caractéristiques intrinsèques des revêtements des alvéoles MA-VL	211
Tableau 1.4-1 :	Modalités de gestion des incertitudes relatives aux processus mécaniques	217
Tableau 1.4-2 :	Modalités de gestion des incertitudes relatives au transitoire thermique	219
Tableau 1.4-3 :	Modalités de gestion des incertitudes associées au transitoire Hydraulique-Gaz	220
Tableau 1.4-4 :	Modalités de gestion des incertitudes résiduelles associées aux perturbations oxydantes et alcalines	223
Tableau 1.4-5 :	Modalités de gestion des incertitudes associées aux processus de corrosion des conteneurs de stockage HA	224
Tableau 1.4-6 :	Modalités de gestion des incertitudes associées aux perturbations chimiques issues des déchets MA-VL	227
Tableau 1.7-1 :	Liste des cas de calcul associés au domaine d'évolution normale	232
Tableau 1.7-2 :	Liste des scénarios d'évolution altérée après fermeture (hors intrusion humaine involontaire)	233
Tableau 1.7-3 :	Liste des scénarios What-if (hors intrusions humaines involontaires)	234
Tableau 2.1-1 :	Liste des radionucléides retenus pour l'évaluation quantitative du scénario d'évolution normale (chaînes de filiation incluses)	239
Tableau 2.1-2 :	Paramètres applicables aux argilites du Callovo-Oxfordien saines (SNC : surface de non-conformité ; LSO : limite de séquence 0)	241
Tableau 2.1-3 :	Propriétés de rétention et de transfert des principaux radionucléides dans les argilites saines	242
Tableau 2.1-4 :	Paramètres applicables aux argilites du Callovo-Oxfordien endommagées	244
Tableau 2.1-5 :	Facteurs correctifs appliqués aux paramètres de transport et de rétention en fonction de la température, dans le Callovo-Oxfordien sain ou endommagé mécaniquement	245
Tableau 2.1-6 :	Facteurs correctifs (F) appliqués aux paramètres de rétention et de transport en fonction des perturbations chimiques dans le Callovo-Oxfordien sain ou endommagé mécaniquement	250
Tableau 2.1-7 :	Dimensions et caractéristiques de transport retenues pour le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL	252
Tableau 2.1-8 :	Propriétés de rétention (sorption et solubilité) des principaux radionucléides dans le béton de revêtement des alvéoles MA-VL	252
Tableau 2.1-9 :	Paramètres applicables au noyau argileux à base d'argiles gonflantes	256

Tableau 2.1-10 :	Paramètres applicables aux galeries remblayées	257
Tableau 2.1-11 :	Valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés retenus pour iode 129, chlore 36 et sélénium 79	261
Tableau 2.1-12 :	Valeurs des paramètres de rétention retenus pour iode 129, chlore 36 et sélénium 79	261
Tableau 2.1-13 :	Paramètres applicables aux formations encaissantes	264
Tableau 2.3-1 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence - Bilan des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert Callovo-Oxfordien et ouvrages	274
Tableau 2.3-2 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence : bilan des débits molaires d'iode 129 et de chlore 36 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire initial des quartiers HA et du quartier MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien (au toit)	278
Tableau 2.3-3 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence, quartier MA-VL, alvéoles MA-VL avec et « sans scellement » : bilan de la quantité d'iode 129 (cumul sur un million d'années, normé par l'inventaire initial de la zone MA-VL) entrant dans les galeries de liaison et dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien	279
Tableau 2.3-4 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence - Bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, du Callovo-Oxfordien aux exutoires. Valeurs normées par rapport à l'inventaire initial total	283
Tableau 2.3-5 :	Scénario d'évolution normale - Situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude	285
Tableau 2.3-6 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage haut ») - Bilan des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux par les voies Callovo-Oxfordien et ouvrages	288
Tableau 2.3-7 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage bas ») - Bilan des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux par les voies Callovo-Oxfordien et ouvrages	288
Tableau 2.3-8 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« Stockage haut ») : cumul sur un million d'année des quantités d'iode 129 et chlore 36 entrant dans les galeries d'accès, les galeries de liaison et la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien. Pourcentage par rapport à l'inventaire initial des quartiers HA et MA-VL.	292
Tableau 2.3-9 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage haut »), quartier MA-VL, alvéole MA-VL avec scellement ou avec dispositif de fermeture de performance moindre : bilan de la quantité d'iode 129 (cumul sur un million d'années, normé par l'inventaire initial du quartier MA-VL) entrant dans les galeries de liaison et dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien	294
Tableau 2.3-10 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien. Bilan des débits molaires en iode 129 et chlore 36 cumulés sur un million d'années, du toit du Callovo-Oxfordien à l'exutoire du Barrois. Valeurs normées par rapport à l'inventaire initial total.	296
Tableau 2.3-11 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - « Stockage bas » implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien. Bilan des débits molaires en iode 129 et chlore 36 cumulés sur un million d'années, du	

	mur du Callovo-Oxfordien à l'exutoire du Dogger. Valeurs normées par rapport à l'inventaire initial total.	296
Tableau 2.3-12 :	Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe : doses maximales et occurrence des doses maximales aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude	299
Tableau 2.4-1 :	Scénario d'évolution normale : doses maximales et occurrence des doses maximales aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude	304
Tableau 3.1-1 :	Scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements	306
Tableau 3.1-2 :	Valeur des perméabilités des argilites endommagées mécaniquement pour les scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements par la ZFC (les valeurs dégradées dans le cadre des SEA sont ombrées)	311
Tableau 3.1-3 :	Débits d'eau sortant des LSF et vitesses d'écoulement en sortie de quartier MA-VL pour le SEN et les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (hypothèses de la situation de référence et enveloppe du SEN)	313
Tableau 3.1-4 :	SEN situations de référence et enveloppe - Bilan des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total HA et MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, dans les galeries de liaison, dans la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien (318
Tableau 3.1-5 :	SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface - Débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maximas et rapport entre les maximas par la voie ouvrage et la voie du Callovo-Oxfordien	320
Tableau 3.1-6 :	SEA de dysfonctionnement de tous les scellements (situations de référence et enveloppe). Bilan des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage de l'inventaire total du quartier MA-VL) entrant dans les galeries de liaison, dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien -	321
Tableau 3.1-7 :	SEN et SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude (situation enveloppe)	324
Tableau 3.2-1 :	SEA défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0 – situation de « référence » : bilan de la quantité, d'iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total des déchets HA) relâchée à 1 million d'années entrant dans les galeries et la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	330
Tableau 3.2-2 :	SEA défaillance des conteneurs de stockage HA0 –situation de « référence » : bilan de la quantité de chlore 36 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) relâchée à un million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	330
Tableau 3.2-3 :	SEA défaillance des conteneurs de stockage HA du quartier HA0 - situation enveloppe : bilan de la quantité en iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) relâchée à un million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	331
Tableau 4.1-1 :	Localisations possibles des forages par rapport au système de stockage et aux panaches de radionucléides	336
Tableau 4.1-2 :	Situations de forage en fonctions des phases de vie du forage et en fonction de l'état de resaturation du stockage.	338

Tableau 4.3-1 :	Évaluation de la dose reçue par un foreur pour une exposition externe à une carotte prélevée à 500 ans, pour les 5 premières familles HA et MA-VL.	350
Tableau 4.3-2 :	Évaluation de la dose foreur pour une exposition externe à une carotte à 500 ans pour les 5 premières familles HA et MA-VL au regard de l'indicateur combiné « risque exposition externe ».	351
Tableau 5.1-1 :	Scénarios « What-if » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture	360
Tableau 5.1-2 :	Scénarios « What-if » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture - Valeur des perméabilités (m/s) des argilites endommagées mécaniquement et valeurs dégradées dans le cadre des What-if sont ombrées	364
Tableau 5.1-3 :	Scénarios « What-if » - Débits d'eau sortant des LSF et vitesses d'écoulement en sortie de quartier MA-VL (hypothèses de la situation de référence et de la situation enveloppe)	366
Tableau 5.1-4 :	SEN et scénarios « What-if » de dysfonctionnement des scellements - bilan des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total HA et MA-VL) entrant dans les galeries, dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et des argilites au toit du Callovo-Oxfordien	371
Tableau 5.1-5 :	Scénarios « What-if » de dysfonctionnement des scellements - Débits molaires d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien : Débit molaire maximum, date d'occurrence et rapport entre les maxima par la voie ouvrage et la voie argilites	373
Tableau 5.1-6 :	SEN et scénario « What-if » dysfonctionnement de tous les scellements - doses maximales à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude (situation enveloppe) et date d'occurrence des doses maximales	376
Tableau 5.2-1 :	Scénario « What-if » de défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0 - situation de référence : bilan de la quantité d'iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) à 1 million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	381
Tableau 5.2-2 :	Scénario What-if de défaillance des conteneurs de stockage HA0 - Comparé au SEN situation de « référence » : bilan de la quantité en chlore 36 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) à 1 million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	381
Tableau 5.2-3 :	SEA défaillance des conteneurs de stockage HA du quartier HA0 - situation enveloppe: bilan de la quantité en iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) à 1 million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien	382
Tableau 1.4-1 :	Au stade de la fin d'avant-projet sommaire, principales opportunités d'optimisation et variantes techniques identifiées ayant un impact potentiel sur la sûreté après fermeture sont les suivantes	395
Tableau 2.2-1	Liste préliminaire des besoins prévisionnels de surveillance spécifiques à la sûreté après fermeture	403
Tableau 2.4-1 :	Textes règlementaires	411
Tableau 2.4-2 :	Standards internationaux	412
Tableau 2.4-3 :	Bonnes pratiques internationales	412
Tableau 2.4-4 :	Liste des CIPR	413
Tableau 2.4-5 :	Groupes de référence hypothétiques identifiés pour une biosphère type tempérée	448
Tableau 2.4-6 :	Groupes de référence hypothétiques identifiés pour une biosphère type tempérée	451
Tableau 2.4-7 :	Caractéristiques de transport et rétention des zones fracturées connectées (ZFC) et à fracturation diffuse (ZFD)	454

Tableau 2.4-8 :	Caractéristiques de transport et de rétention retenues dans les argilites fracturées (ZFC) sous influence de la perturbation alcaline	455
Tableau 2.4-9 :	Caractéristiques de rétention chimique dans les argilites (saines ou endommagées) affectées par le panache de substances organiques complexantes	456
Tableau 2.4-10 :	Caractéristiques de rétention chimique dans les matériaux cimentaires affectés par le panache de substances organiques complexantes	456
Tableau 2.4-11 :	Caractéristiques de transport et rétention retenues dans les matériaux affectés par le panache salin	457
Tableau 2.4-12 :	Caractéristiques de transport et rétention retenues dans le noyau argileux	457

VOLUME I - CONTEXTE - OBJECTIFS - STRATEGIE DE SURETE

1

Contexte et objet

1.1	<i>Le besoin</i>	26
1.2	<i>Le projet Cigéo - un processus par étapes</i>	27
1.3	<i>Le périmètre et objet du document</i>	31

1.1 Le besoin

L'objectif du centre industriel de stockage de déchets HA-MAVL Cigéo est de permettre la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportés par les générations futures, conformément à l'article L542-1 du Code de l'environnement.

Les déchets radioactifs à prendre en compte pour la conception de Cigéo sont des déchets ultimes, c'est-à-dire des déchets « qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux » (Article L542-1-1 du Code de l'environnement).

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

Une partie des déchets radioactifs à prendre en compte pour la conception de Cigéo est aujourd'hui produite, le reste étant à produire dans le cadre de la poursuite des activités françaises de production électro-nucléaire, de recherche et de défense, y compris le démantèlement des installations.

L'article L542-1-1 du Code de l'environnement précise que « le stockage de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542-1. Contrairement à une installation d'entreposage, cela implique de prévoir la possibilité de « fermer¹ Cigéo ».

La protection de l'homme et de l'environnement sur Cigéo repose dans un premier temps sur l'accomplissement de fonctions de sûreté en exploitation qui sont comparables à celles de toute autre installation nucléaire, les référentiels, les exigences de sûreté et les options étant adaptées à la spécificité souterraine de Cigéo.

Après sa fermeture définitive, Cigéo vise à isoler les déchets de l'homme et de la biosphère et à les confiner dans une formation géologique profonde pour s'opposer à la dissémination des radionucléides qu'ils contiennent. Ces fonctionnalités s'effectuent sur de grandes échelles de temps (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années), de manière passive, c'est-à-dire sans nécessiter de maintenance ou de surveillance, comme le rappelle le guide de sûreté relatif au stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde², publié par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en 2008(1). Cela repose sur le choix du milieu géologique, plus particulièrement la roche hôte et sur la conception du stockage, plus particulièrement son architecture et ses composants ouvrages.

¹ 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. (Article L542-10-1 du Code de l'environnement)

² Le guide de sûreté publié en par l'ASN stipule que (§ 4.1, Objectifs) :

- « 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 ou 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 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. »
- « A cet égard, le concept retenu pour le stockage devra permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques, et des facteurs économiques et sociaux ».

Le projet de centre industriel de stockage de déchets HA MA-VL s'inscrit, conformément à l'article L542-1 du Code de l'environnement, dans « la recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs (...) afin de prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations futures ».

La sûreté passive après fermeture constitue la spécificité de Cigéo pour y répondre. La mise en œuvre des dispositions passives repose pour une grande part sur les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien (« argilites ») étudiée depuis plusieurs années, au moyen notamment du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Les recherches sur le stockage en formation géologique profonde menées depuis 1991 s'inscrivent dans l'objectif de « prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations futures ».

1.2 Le projet Cigéo - un processus par étapes

1.2.1 Des itérations de sûreté dès le début du projet

En 1991, la loi (2) sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue a confié à l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, la mission d'évaluer la possibilité d'un stockage des déchets en formation géologique profonde, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains (axe 2 de la loi). L'ASN a par ailleurs émis en 1991 une règle fondamentale de sûreté (RFS III.2.f) (3) qui précisait les attentes en matière de sûreté à long terme vis-à-vis du stockage, les principes de conception, les critères de sélection de milieux géologiques propices et les modalités d'études et fixait les objectifs fondamentaux qui doivent guider les travaux sur le stockage.

Des itérations de sûreté ont été mises en œuvre dès cette date en s'appuyant sur l'acquisition de connaissances phénoménologiques, le développement de méthodes appropriées à la spécificité du stockage en formation géologique profonde, la recherche et le développement de solutions technologiques.

Cette démarche itérative s'appuie ainsi sur le lien étroit entre la conception, les acquisitions de connaissance et les évaluations de sûreté comme illustré par la figure ci-après.

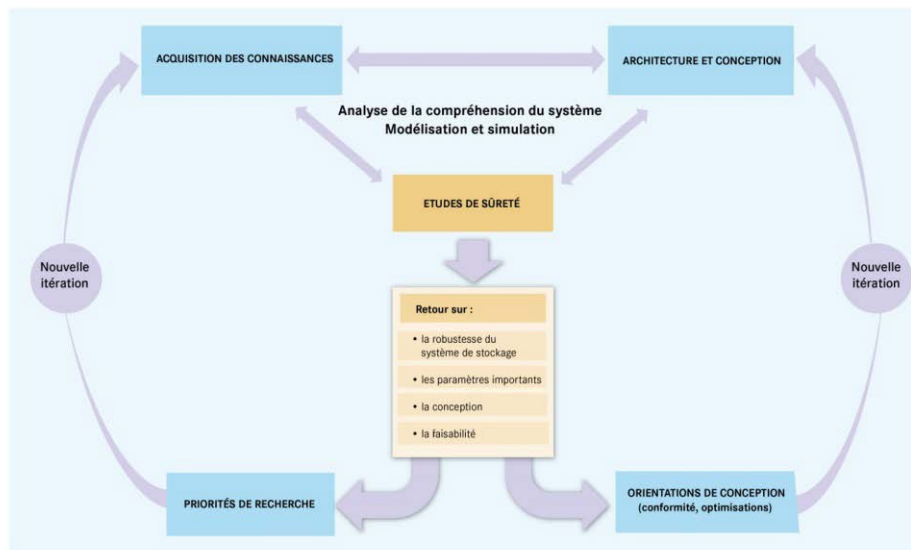


Figure 1.2-1 : Illustration du processus itératif

Chaque itération se caractérise ainsi par des acquisitions de connaissances et par l'étude de concepts d'architecture en cohérence avec ces connaissances. Ces dernières permettent d'appréhender le comportement des concepts étudiés au moyen de modélisations, d'expérimentations et de démonstrateurs.

Cette démarche a ainsi permis de tirer les enseignements des itérations successives 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 et incertitudes identifiés.

Chaque itération de sûreté intermédiaire associée au jalonnement du développement du projet Cigéo (dénommé HAVL puis HA-MA-VL avant 2010) a fait l'objet d'instructions par l'ASN et d'évaluations par les pairs. Cela a contribué à identifier progressivement les enjeux de sûreté et à proposer les options de sûreté objet du présent document, en vue de la demande d'autorisation de Création de Cigéo. Ces options de sûreté intègrent ainsi l'ensemble du retour d'expérience.

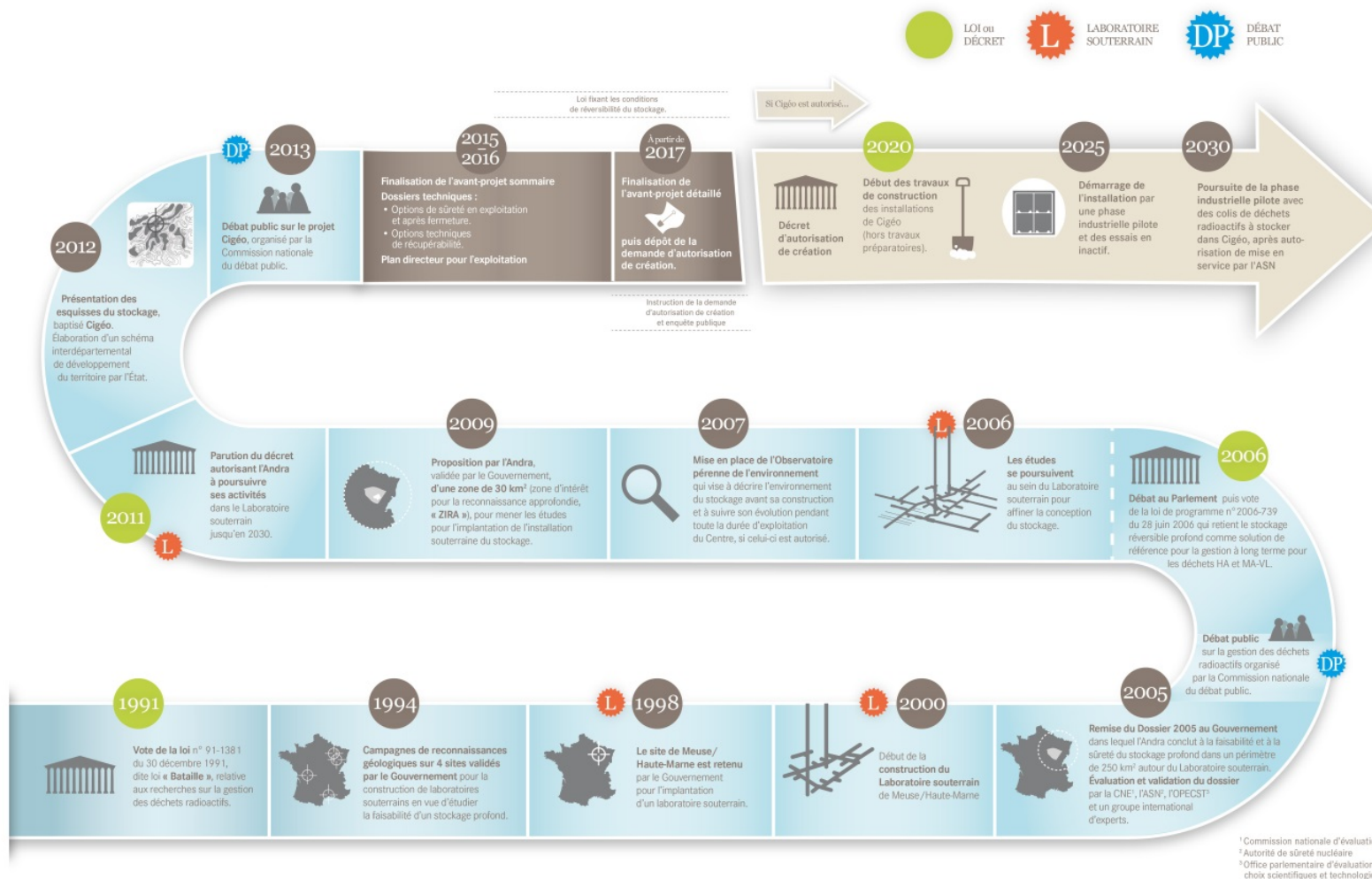


Figure 1.2-2 : Le développement du projet Cigéo un processus itératif en matière de sûreté par étapes depuis 1991

1.2.2 Repères chronologiques

Depuis 1991, l'Andra a engagé un important programme de recherches pour l'étude du stockage en formation argileuse comprenant notamment l'étude du site de Meuse/Haute-Marne et d'une roche argileuse (argilites) âgée d'environ 155 millions d'années, le Callovo-Oxfordien, située à une profondeur de 400 à 600 m.

En 1998, le gouvernement a décidé la construction d'un Laboratoire souterrain en Meuse/Haute-Marne, les travaux de construction du Laboratoire souterrain ont débuté en 2000 sur la commune de Bure en parallèle des reconnaissances géologiques que l'Andra a continué de mener localement.

En 2005, au terme de 15 années de recherches réalisées dans le cadre de cette loi du 30 décembre 1991, l'Andra a produit le « Dossier 2005 » (4) relatif à la faisabilité de principe d'un stockage réversible des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue dans la formation d'argilite du Callovo-Oxfordien étudiée au moyen du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Au stade du Dossier 2005, le but de l'étude de 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 dans ce Dossier ne prétendaient pas être optimisées, en particulier au plan de la sûreté d'exploitation et de la radioprotection. Le positionnement du stockage était fixé au sein de la zone de 250 km² définie autour du Laboratoire dans laquelle les résultats du Laboratoire peuvent être transposés. Le Dossier 2005 a distingué deux phases de vie du stockage et conduit deux analyses de sûreté complémentaires : l'une relative à l'exploitation, l'autre relative à l'évolution après fermeture liée à la spécificité du stockage. 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, avis de l'Autorité de sûreté nucléaire, rapport de la revue internationale d'experts menée sous l'égide de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE à la demande des ministères de tutelle de l'Andra. Ces évaluations ont confirmé les résultats de l'Andra sur la faisabilité et la sûreté d'un stockage profond sur le site étudié en Meuse/Haute-Marne³.

A la suite de l'instruction du Dossier 2005 et du débat public de début 2006, le 28 juin 2006, la loi de programme n°2006-739 sur la gestion durable des déchets radioactifs a été promulguée (5). 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 ». La loi du 28 juin 2006 donne à l'Andra la mission de concevoir et d'implanter le centre de stockage réversible qui accueillera ces déchets.

En 2008, dans la même logique qu'en 1991, l'ASN a mis à jour la RFS III.2f (3) et l'a ainsi remplacée par le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (1). Cette mise à jour tient compte notamment des travaux effectués par l'Andra et de leur instruction, ainsi que des orientations désormais fixées par la loi de programme du 28 juin 2006. Les principales modifications introduites dans le projet de RFS mise à jour sont relatives à la notion de réversibilité, au contrôle des matières nucléaires, aux objectifs de la surveillance de l'installation et à la définition des fonctions de sûreté du stockage.

En 2009, pour étudier l'implantation de l'installation souterraine, l'Andra a proposé au Gouvernement une zone souterraine de 30 km² (dénommée ZIRA : zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie), située au sein de la zone de 250 km² définie en 2005. Dans la logique de démarche itérative, l'Andra a transmis un Dossier à l'ASN en 2009 conformément au décret n°2008-357 du 16 avril 2008 pris pour 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. Ce Dossier comprenant notamment le document de « Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios

³ Extrait de l'Avis de l'ASN émis en 2006 : « Le dossier 2005 argile, remis par l'ANDRA à ses ministres de tutelle, en juin 2005, a été instruit par l'IRSN et a fait l'objet d'un avis du groupe permanent d'experts en charge des déchets radioactifs dans la séance du 12 au 13 décembre 2005. Ces examens mettent en évidence que des résultats majeurs relatifs à la faisabilité et à la sûreté d'un stockage ont été acquis sur le site de Bure. L'ASN considère que le stockage en formation géologique profonde est une solution de gestion définitive qui apparaît incontournable. »

d'implantation en surface » a fait l'objet d'avis publiés par l'Autorité de sûreté et disponibles sur son site.

En 2010, la zone proposée par l'Andra, située à quelques kilomètres du Laboratoire souterrain, a ainsi été validée par le Gouvernement, après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), de la Commission nationale d'évaluation (CNE) et après consultation des élus et du Comité local d'information et de suivi du Laboratoire (Clis). L'Andra a ensuite conduit une nouvelle campagne de reconnaissance géologique dont les résultats ont confirmé que la formation du Callovo-Oxfordien située dans cette zone présente les caractéristiques favorables à l'implantation d'un stockage profond. Si Cigéo est autorisé, l'installation souterraine sera implantée dans cette zone.

En 2011, l'Andra a engagé la phase de conception industrielle du projet Cigéo qui se déroule en plusieurs étapes clés dont une phase d'esquisse, une phase d'avant-projet-sommaire puis détaillée ; les résultats d'études relatifs à l'avant-projet détaillé servant de support à la future demande d'autorisation. Les orientations retenues dans le cadre de l'esquisse pour le projet industriel ont fait l'objet d'un dossier de maîtrise d'ouvrage support au débat public de 2013 sur le projet Cigéo.

Du 15 mai au 31 juillet 2013 et du 1^{er} septembre au 15 décembre 2013, un débat public sur le projet Cigéo a été organisé par la Commission nationale du débat public (CNDP). En tant que maître d'ouvrage du projet Cigéo, l'Andra a présenté notamment l'inventaire prévisionnel des déchets à stocker, les propositions de localisation des installations de Cigéo, un ensemble de propositions de l'Andra en matière de réversibilité, les résultats des études d'esquisse.

Entre 2009 et 2014, l'Andra a émis des dossiers intermédiaires qui ont fait l'objet d'instructions sous l'égide de l'ASN par son appui technique l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Dans le cadre de chaque instruction, l'ASN a notamment émis un avis dans lequel elle a pris position et formulé des demandes en vue du dossier d'options de sûreté ainsi que pour la demande d'autorisation de création. Tous ces éléments sont accessibles sur le site de l'ASN.

Le 5 mai 2014, à la suite du débat public sur le projet « Cigéo » dont les conclusions ont été rendues, le conseil d'administration de l'Andra a indiqué par délibération (6) que « l'Andra remettra à l'État un ensemble de documents constitué d'une proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo, du dossier d'options de sûreté et du dossier d'options techniques de récupérabilité pour préparer l'instruction de la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo. »

Le 19 décembre 2014, l'ASN a par ailleurs formulé dans sa lettre CODEP-DRC-2014-039834 ses attentes vis-à-vis des options de sûreté de Cigéo. Il est notamment mentionné que le dossier d'options de sûreté devra « *présenter explicitement les objectifs, concepts et principes retenus afin d'assurer la sûreté de l'installation en exploitation [..]. Ces demandes sont complétées [...] par une liste détaillée des éléments nécessaires pour que l'instruction du dossier d'options de sûreté puisse être valablement menée.*

1.3 Le périmètre et objet du document

1.3.1 Périmètre

Le présent document correspond à la phase d'avant-projet sommaire du projet Cigéo et fait partie d'un ensemble de pièces répondant aux demandes de l'ASN dans sa lettre du 19 décembre 2014 et listées ci-après :

- le document d'options de sûreté relatif à la phase exploitation [DOS-Expl] qui présente les objectifs, les fonctions de sûreté et les options techniques retenues associées ; les options de sûreté vis-à-vis de la maîtrise des risques et les premières évaluations d'impact (7) ;
- le document d'options de sûreté relatif à la phase après fermeture [DOS-AF] qui constitue le présent document et dont l'objet et le contenu sont précisés en sections suivantes ;
- la première version des spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo⁴ ;

⁴ Les spécifications préliminaires d'acceptation des colis sont prévues pour la DAC.

- le plan directeur pour l'exploitation (PDE) (8) qui présente le déroulement du projet Cigéo comprenant la phase industrielle pilote ainsi que les possibilités offertes par la réversibilité en termes de conduite du projet (8) ;
- le document d'options techniques de récupérabilité (DORec) qui présente les principales options techniques pour permettre le retrait des colis de déchets (9) ;
- l'étude de l'adaptabilité de Cigéo à l'éventuel stockage des combustibles qui présente les éléments techniques associés (10) ;
- l'étude de l'adaptabilité de Cigéo à l'éventuel stockage des déchets en réserve qui présente les éléments techniques (11) ;
- l'esquisse de la notice limitée aux capacités techniques de l'exploitant (12).

1.3.2 Objet

Ce document présente les options de sûreté proposées pour que Cigéo réponde à ses objectifs en matière de sûreté après fermeture. Ainsi, il a pour principaux objectifs de :

- décrire les objectifs, principes et fonctions de sûreté après fermeture de Cigéo et mettre en évidence comment ils sont pris en compte par la conception du projet et le choix du site d'implantation, notamment comment les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien argileux y contribuent ;
- montrer que des solutions techniques existent pour les ouvrages de fermeture ;
- montrer que les incertitudes dans la connaissance sont identifiées et prises en compte par la conception et l'évaluation de sûreté ;
- présenter la liste des scénarios retenus pour l'évaluation de la sûreté et leur classification en réponse au guide de sûreté du stockage géologique (1) et en cohérence avec les pratiques internationales ;
- présenter l'impact radiologique du stockage à terminaison sur l'environnement et sur l'homme, pour les principaux scénarios considérés.

Pour ce faire, le document est structuré en quatre volumes :

- le 1^{er} volume fixe les principes, textes et démarche de sûreté après fermeture (comprenant les fonctions de sûreté) applicables à Cigéo ;
- le 2^{ème} volume décline les fonctions de sûreté et les exigences applicables à la conception de Cigéo. Ce volume comprend aussi la description des colis et plus particulièrement des modèles de colis retenus pour la sûreté et l'inventaire à terminaison, du site d'implantation et des options techniques retenues au stade de l'avant-projet en termes d'architecture, d'alvéoles de stockage, d'ouvrages de fermeture et les performances associées ;
- le 3^{ème} volume traite l'évaluation de sûreté après fermeture. Il liste les scénarios retenus et présente des évaluations quantitatives au niveau du DOS ;
- le 4^{ème} volume présente les enseignements tirés au stade de l'avant-projet et identifie les activités importantes au stade de l'avant-projet à mettre en place notamment dès la construction et pendant l'exploitation.

Les présentes options de sûreté considèrent Cigéo comme un « système de stockage ».

Conformément au guide de sûreté du stockage géologique publié par l'ASN en 2008 (1), ce système comprend un ensemble de composants manufacturés et naturels dont le Callovo-Oxfordien. Il est conçu pour assurer de manière robuste les trois grandes fonctions de sûreté après fermeture prévues par le guide :

- « s'opposer à la circulation de l'eau dans l'installation de stockage » ;
- « confiner la radioactivité » ;
- « isoler les déchets de l'homme et de la biosphère pour que la sûreté du stockage ne soit pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion climatique ou par les activités humaines banales ».

A la fin de l'exploitation de Cigéo et de sa fermeture définitive, que seule une loi pourra

autoriser, la configuration de Cigéo correspondra à une installation souterraine « à terminaison » comprenant l'ensemble des alvéoles de stockage remplis, des galeries remblayées et comportant des scellements ainsi que des puits et descenderies remblayés et scellés. Cette configuration fonde l'évaluation de sûreté après fermeture présentée dans ce document, particulièrement dans le Volume III. Dans sa version actuelle, le plan directeur pour l'exploitation de Cigéo (8) envisage la fermeture définitive de Cigéo vers 2150. Auparavant l'exploitation de Cigéo aura suivi un développement incrémental et déploiement progressif offrant notamment la possibilité aux générations futures d'intégrer les pistes d'optimisations qui seront rendues possibles par les progrès scientifiques et techniques et par le retour d'expérience, dans le respect des objectifs de sûreté en exploitation et après fermeture.

2

Présentation générale de Cigéo

2.1	<i>Le centre de stockage après fermeture</i>	36
2.2	<i>L'implantation de Cigéo</i>	38
2.3	<i>Le phasage de Cigéo après sa fermeture définitive et les échelles de temps</i>	40

2.1 Le centre de stockage après fermeture

Conformément au guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde publié par l'ASN en 2008 (1), le système de stockage après fermeture comprend trois grandes catégories de composants :

- le Callovo-Oxfordien, formation hôte dans laquelle est implantée l'installation souterraine de Cigéo ;
- les colis de stockage de déchets ;
- l'installation de stockage fermée définitivement comprenant les alvéoles de stockage des colis de déchets et les liaisons d'accès.

L'installation souterraine sépare les zones où sont stockés les déchets HA (et éventuellement des combustibles nucléaires qui ne seraient pas traités) de celles où sont stockés les déchets MA-VL, afin de limiter les interactions phénoménologiques entre ces différentes catégories de déchets.

Les déchets HA issus du traitement des combustibles usés correspondent aux produits de fission et actinides mineurs séparés de l'uranium et du plutonium, calcinés et incorporés dans une matrice de verre elle-même coulée dans un conteneur en acier inoxydable.

Les déchets MA-VL sont essentiellement constitués des éléments de structure des combustibles usés traités et des déchets liés au fonctionnement, à la maintenance et au démantèlement des installations nucléaires. Les conteneurs employés par les producteurs de déchets pour le conditionnement des déchets MA-VL sont de nature et de gabarits variés. Ils peuvent être en acier non allié, en acier inoxydable, en béton armé ou fibré.



Figure 2.1-1 : Illustrations de colis de déchets fabriqués par AREVA ; à gauche colis de déchets vitrifiés HA, à droite colis de déchets de maintenance MA-VL

Les déchets sont stockés sous forme de « colis de stockage »⁵ qui, dans l'installation souterraine, sont placés dans des « alvéoles ». Les alvéoles sont des excavations souterraines de forme sphérique à ovoïde et d'axe horizontal ou à faible pente creusées dans le Callovo-Oxfordien.

⁵ Ces colis participent à la sûreté du stockage en phase d'exploitation, ainsi qu'autant que nécessaire à la sûreté du stockage après fermeture de l'installation. (Guide de sûreté de 2008 relatif au stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde)

Il existe deux catégories d'alvéoles :

- des alvéoles HA de type micro-tunnel ne contenant qu'un seul colis de stockage par section d'alvéole ; chaque micro-tunnel est doté d'un « chemisage » destiné à soutenir mécaniquement l'alvéole a minima pendant son exploitation ;
- des alvéoles MA-VL de type tunnels contenant plusieurs colis de stockage par section d'alvéole, dont la stabilité mécanique pendant l'exploitation est assurée par un revêtement (celui-ci est laissé en place lors de la fermeture).

Pour sa construction, la mise en stockage des colis de déchets, et sa gestion jusqu'à sa fermeture, chaque alvéole est desservi par une ou des galeries d'accès. Le revêtement des galeries d'accès assure leur stabilité mécanique pendant la phase d'exploitation (il est également laissé en place lors de la fermeture).

Les alvéoles sont organisées dans chacune des zones précitées en un ou plusieurs quartiers distincts les uns des autres. Un quartier est un regroupement borgne d'alvéoles et de galeries. Pour les colis de déchets HA, on distingue le quartier HAO, accueillant des colis de déchets moyennement exothermiques et susceptible d'être mis en œuvre dès la phase industrielle pilote, et les quartiers HA1/HA2, accueillant des colis de déchets fortement exothermiques et mis en œuvre au-delà de 2075.

Les quartiers sont connectés aux ouvrages de liaison entre la surface et l'installation souterraine par l'intermédiaire de « galeries de liaison ». Les ouvrages de liaison entre la surface et l'installation souterraine, dénommés « liaisons surface-fond », sont constitués de deux descenderies et de puits verticaux regroupés et en nombre de sections définis par leurs fonctions en exploitation⁶ [cf. Volume II du DOS-Expl]. Après la fermeture définitive de Cigéo, l'ensemble des galeries de l'installation souterraine est remblayé et scellé par endroits. Les descenderies et les puits verticaux sont remblayés et scellés.

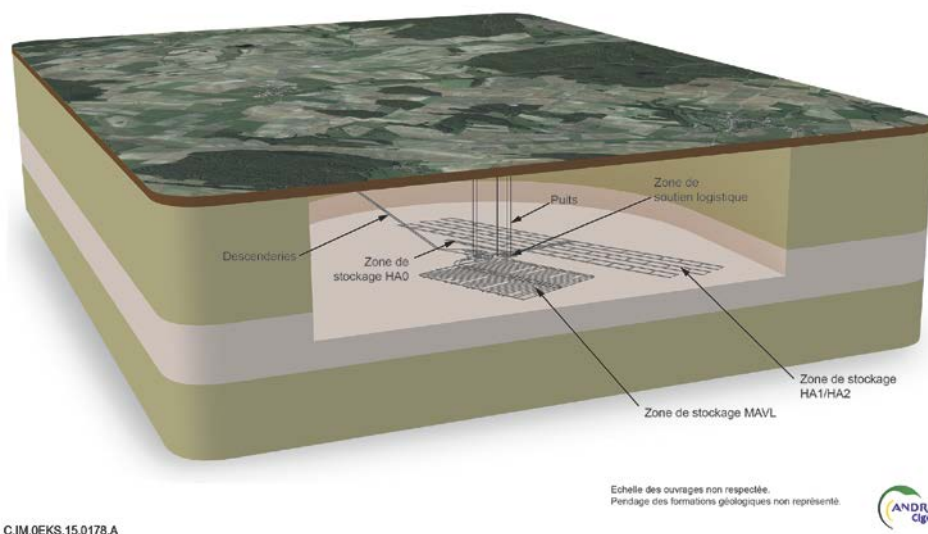


Figure 2.1-2 : Illustration de l'installation souterraine de Cigéo une fois fermée définitivement (sous réserve de son autorisation par une loi)

⁶ Un revêtement assure la stabilité mécanique des galeries de liaison et des liaisons surface-fond pendant l'exploitation. Il est laissé en place lors de la fermeture, à l'exception de dispositions particulières aux scelllements décrites au volume II.

Le centre Cigéo et plus particulièrement l'installation souterraine après sa fermeture définitive sera l'installation telle que construite.

A ce stade, l'architecture souterraine, objet du présent document, constitue donc une illustration de ce que pourrait être cette architecture en projetant les options techniques retenues au stade de l'avant-projet sommaire et sans prise en compte des pistes d'optimisations.

A chaque évolution de l'architecture au fur et à mesure du développement incrémental de Cigéo, il sera vérifié l'impact des pistes d'optimisations sur les éléments importants pour la sûreté après fermeture ainsi que l'impact global en termes de conséquences pour l'homme et l'environnement.

Les pistes d'optimisations et les solutions techniques envisagées à ce stade et dont les résultats d'études de faisabilité industrielle ou de démonstration arriveront au-delà de la DAC sont présentées plus particulièrement dans le volume II et le volume IV.

2.2 L'implantation de Cigéo

Les installations du futur Centre industriel de stockage géologique (Cigéo) se situent dans l'Est de la France, à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne. Les recherches menées par l'Andra depuis les années 1990, notamment à l'aide d'un Laboratoire souterrain à partir de 2002 (15), ont permis d'identifier une zone du bassin de Paris géologiquement favorable à l'implantation d'un stockage en formation géologique profonde de déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue, puis une zone plus restreinte d'une surface d'environ 250 km² (dite zone de transposition, ou ZT) au sein de laquelle la formation hôte du Callovo-Oxfordien présentait des propriétés similaires à celles observées dans le Laboratoire souterrain (15).

Le choix d'implantation des installations de Cigéo (surface et souterrain) résulte d'une démarche progressive menée depuis 2006 avec une étape importante en 2009. Ainsi, l'Andra a déposé en 2009 un document relatif à la proposition d'une zone plus restreinte au sein de la ZT, la zone dite d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA), d'environ 30 km², et de scénarios d'implantation en surface (21). Ce document a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN à la demande de l'ASN.

Le 5 janvier 2010, l'ASN a rendu un avis au Ministre d'État, Ministre de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer et au Ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche sur le document précité de l'Andra. Dans son avis, l'ASN estimait que les critères retenus par l'Andra pour choisir la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie étaient pertinents et cohérents avec le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de 2008(1). L'ASN a estimé que la localisation proposée par l'Andra pour la ZIRA était satisfaisante du point de vue de la sûreté et n'avait pas d'objection à la réalisation des travaux de reconnaissance prévus par l'Andra dans cette zone (13)

La proposition de l'Andra concernant la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie en vue de l'implantation de l'installation souterraine de Cigéo s'appuyait 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 ;

- 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 travaux de reconnaissance menés sur la zone de transposition au cours des années 2007 et 2008 ont visé en particulier à disposer d'une connaissance homogène de l'ensemble du secteur d'intérêt. Dans cette optique, 14 forages et une campagne de sismique 2D correspondant à un linéaire total de 170 kilomètres ont été réalisés et 130 kilomètres de profils sismiques anciens ont fait l'objet de retraitement. Les résultats ont ainsi permis de confirmer le périmètre de la zone de transposition, tel que défini dans le Dossier 2005⁷, notamment de confirmer l'homogénéité du contexte sédimentaire et des propriétés du Callovo-Oxfordien ainsi que l'absence de failles mineures. C'est sur la base de ces travaux et du modèle géologique au sens large qui en a été déduit que l'Andra a été en mesure de définir une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) en prenant en compte les critères suivants :

- privilégier une implantation de la ZIRA dans la zone identifiée comme plus intéressante vis-à-vis des critères liés à la géologie et à la sûreté ;
- disposer d'une surface suffisante pour permettre l'implantation dans la ZIRA de l'installation souterraine ;
- être compatible avec une implantation potentielle de l'accès de la descenderie ;
- être compatible avec une implantation potentielle des puits d'accès principaux.

Lors des études 2007-2009, la possibilité de découpler une partie des installations de surface de l'installation souterraine au moyen d'une descenderie a aussi été examinée, afin d'offrir une flexibilité d'implantation pour l'entrée de cet ouvrage jusqu'à environ 5 kilomètres par rapport à la zone des puits (sur la base d'une pente de 10 %). Deux zones d'activité en surface, potentiellement disjointes, sont ainsi considérées : la zone « puits » située de par leurs fonctions à l'aplomb de l'installation souterraine et la zone « descenderie ».

Sur la base de l'ensemble des critères précités, une zone d'implantation de l'installation souterraine ayant une emprise d'une trentaine de kilomètres carrés, a été définie. La profondeur d'implantation des ouvrages de l'installation souterraine au centre de la ZIRA est d'environ 525 mètres et l'épaisseur du Callovo-Oxfordien au centre de la ZIRA est d'environ 148 mètres. La figure ci-après situe la zone d'implantation de l'installation souterraine de Cigéo sur la ZIRA.

⁷ Dans le cadre du Dossier 2005, l'Andra a défini les contours d'une zone dite de transposition au sein de laquelle les propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien et les perturbations qu'engendrerait un stockage pouvaient être considérées comme équivalentes à celles déterminées dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. La délimitation de cette zone reposait donc sur des critères géométriques (épaisseur et profondeur du Callovo-Oxfordien) mais également sur un ensemble d'informations d'ordre sédimentologique, stratigraphique et structural permettant de proposer cette zone, d'une superficie de l'ordre de 250 kilomètres carrés, dans laquelle la continuité et l'homogénéité des propriétés du Callovo-Oxfordien étaient assurées. Les critères permettant de délimiter la zone de transposition, retenus en 2005 et confirmés par la suite, visent principalement à s'assurer de la qualité des capacités de confinement de la formation du Callovo-Oxfordien. Ainsi, ils reposent sur l'épaisseur du Callovo-Oxfordien, le cadre structural, la minéralogie des argilites et le comportement géo-mécanique de la roche.

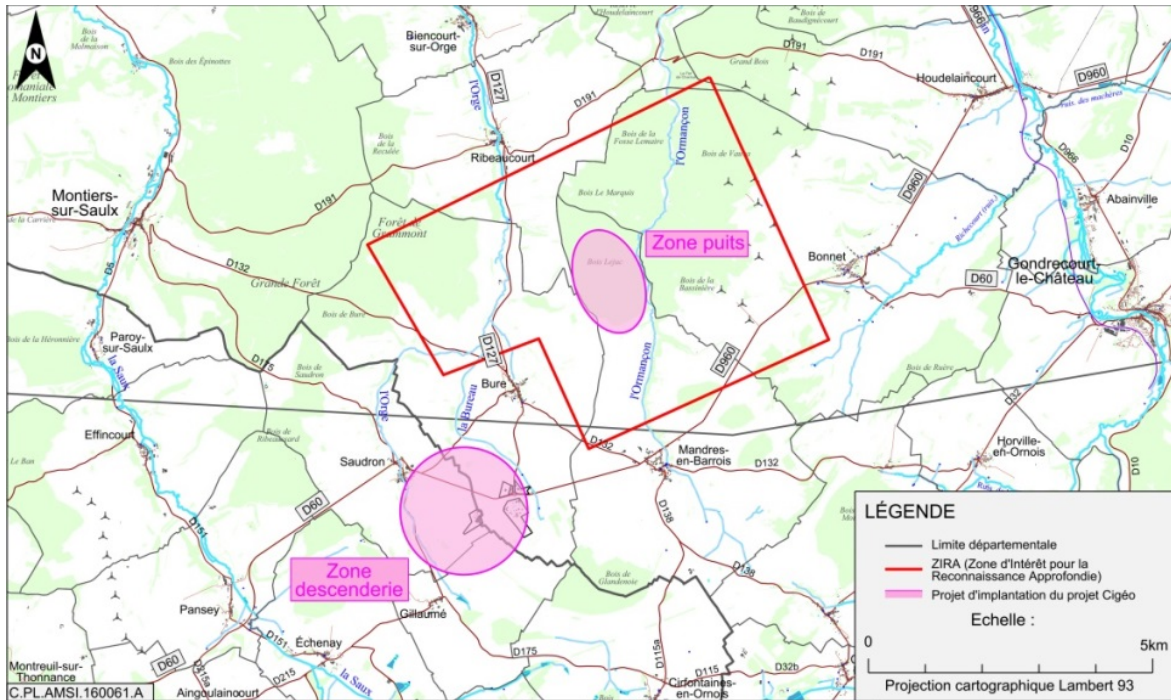


Figure 2.2-1 : Zones d'implantation de Cigéo : zone « puits » et zone « descenderie » et ZIRA

2.3 Le phasage de Cigéo après sa fermeture définitive et les échelles de temps

Comme illustré par la figure ci-après, et comme indiqué dans le plan directeur pour l'exploitation, Cigéo comprend trois grandes phases de vie : une phase de conception initiale et de construction initiale, une phase d'exploitation (comprenant une phase industrielle pilote) et une phase de vie après fermeture.

Cigéo sera par ailleurs fermé progressivement et la phase dite après fermeture démarrera sous réserve de l'autorisation par une loi de la fermeture définitive de Cigéo.

Dans le calendrier actuel, la fermeture définitive de Cigéo est prévue vers 2150.

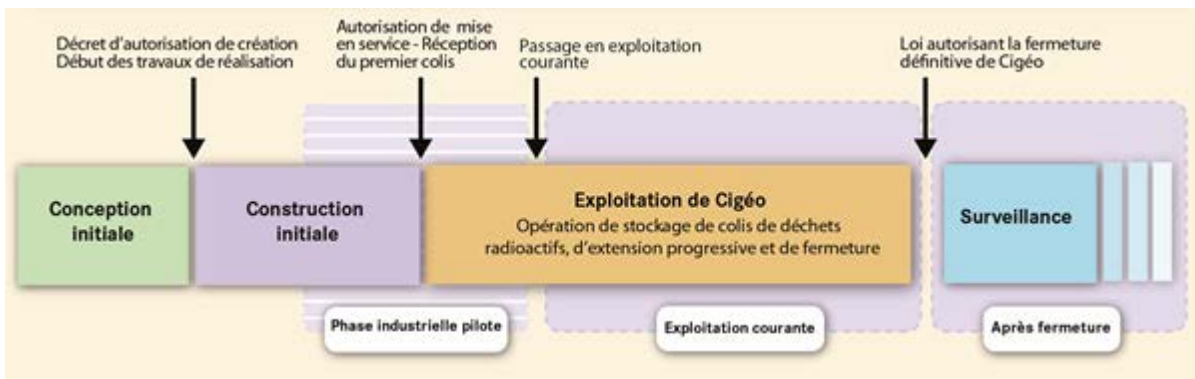


Figure 2.3-1 : Schéma des principales phases temporelles de Cigéo

Pour répondre à l'objectif fondamental de protéger l'homme et l'environnement des déchets radioactifs sur de très longues échelles de temps de manière passive sans nécessiter d'actions humaines, une fois Cigéo ayant eu l'autorisation d'être fermé définitivement, l'ensemble de l'installation souterraine aura été remblayé, les ouvrages de fermeture auront été mis en place dans les galeries et dans les liaisons surface-fond, les installations de surface auront été démantelées⁸.

Conformément au Guide de sûreté ASN 2008 (1), l'Andra retient comme principe « *de ne pas faire reposer la protection de la santé des personnes et de l'environnement sur une surveillance et un contrôle institutionnel qui ne pourront pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée* ».

La surveillance et le contrôle institutionnel associés au maintien de la mémoire de Cigéo pourront néanmoins apporter une robustesse complémentaire, les objectifs et les dispositifs à mettre en œuvre seront précisés dans le rapport de sûreté en support de la demande d'autorisation de création :

- pendant la période de surveillance par l'exploitant dont la durée reste à fixer, certains dispositifs pourraient être maintenus après la fermeture de Cigéo. Cette surveillance après fermeture ne devra pas perturber le système de stockage. Plusieurs solutions opérationnelles de surveillance sont envisageables : techniques non intrusives en surface (géophysique...), mesures dans des forages instrumentés réalisés depuis la surface jusqu'à l'Oxfordien calcaire situé au-dessus du Callovo-Oxfordien, mesures au sein même des ouvrages de stockage avec transmission des données sans fil à travers les terrains depuis le fond jusqu'à la surface. La phase de surveillance s'achèvera avec le déclassement de l'installation tel que prévu à l'article L 593-33 du code de l'environnement. La stratégie de la surveillance après la fermeture de Cigéo sera précisée dans le rapport de sûreté en support à la demande d'autorisation de création¹⁰ ;
- la période de contrôle institutionnel comprendra le maintien de servitudes d'utilité publique prises, le cas échéant, sur la base du 11° du II de l'article 43 du décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 susvisé. Cette période de contrôle institutionnel peut aller au-delà de la période de surveillance ;
- la période de maintien de la mémoire du site après sa fermeture permet de retarder la date d'occurrence d'éventuelles intrusions humaines qui seraient rendues possibles par un oubli de l'existence du stockage. Le principe retenu par l'Andra en matière de gestion de la mémoire repose sur deux exigences :
 - ✓ la recherche de solutions techniques, institutionnelles et sociétales pour maintenir la mémoire le plus longtemps possible (cf. Annexe 2 :) ;
 - ✓ la prise en compte dans l'évaluation de sûreté de la possibilité d'une perte de la mémoire dès 500 ans conformément au guide de sûreté (1) et d'une intrusion humaine involontaire par voie de conséquence dès cette date.

Par ailleurs, les phénomènes internes et externes au stockage qui peuvent s'exprimer depuis la fermeture jusqu'à des échelles de temps dépassant les dizaines de milliers d'années¹¹ conduisent à identifier différentes périodes de temps après fermeture. Ces périodes de temps dépendent (i) des fonctions de sûreté à assurer par les composants en fonction du temps, (ii) de la conception de ces

⁸ Ces opérations correspondent à la « fermeture définitive » mentionnée à l'article L 593-30 du code de l'environnement.

⁹ Selon l'article 3.48 des prescriptions de sûreté particulières SSR5 de l'AIEA, « Pour le stockage géologique et pour le stockage définitif de déchets de moyenne activité, les dispositifs de sûreté passive (barrières) doivent être suffisamment robustes pour ne pas avoir à être réparés ou renouvelés. La sûreté à long terme d'une installation de stockage définitif de déchets radioactifs doit ne pas dépendre de contrôles institutionnels actifs (prescription 22). »

¹⁰ Les systèmes de surveillance après fermeture seront mis en œuvre dès la phase d'exploitation pour permettre d'effectuer des corrélations avec les données obtenues par les dispositifs d'auscultation en exploitation. Cet objectif comporte notamment l'instrumentation ad hoc, dans le cadre de la première tranche de construction, de un ou plusieurs forages depuis la surface jusqu'à l'Oxfordien calcaire (inclus), au droit de l'installation souterraine.

¹¹ Selon la prescription 9 des prescriptions de sûreté particulières SSR5 de l'AIEA, « L'installation de stockage définitif est implantée, conçue et exploitée de façon à offrir des caractéristiques qui visent à isoler les déchets radioactifs des personnes et de la biosphère accessible. Ces caractéristiques sont censées assurer un isolement pendant plusieurs centaines d'années pour les déchets à courte période et au moins plusieurs milliers d'années pour les déchets de moyenne et de haute activité. Pour ce faire, il faut prendre en considération à la fois l'évolution naturelle du système de stockage définitif et les événements perturbateurs de l'installation. »

composants en prenant en compte leur évolution physico-chimique (durée de réalisation des fonctions de sûreté par exemple), et (iii) des phénomènes et processus qui régissent l'évolution du stockage (thermiques (T), hydrauliques-gaz (H-G), mécaniques (M), chimiques (C) et radiologiques (R), climatiques et géodynamiques internes). Ces évolutions peuvent être regroupées en grandes catégories de phénomènes :

- les phénomènes géodynamiques internes et climatiques. Il s'agit de l'évolution du milieu géologique en tenant compte de la géodynamique, de l'évolution climatique et des phénomènes d'érosion ;
- les phénomènes thermiques. Ils sont liés pour l'essentiel à la chaleur dégagée par certains déchets et qui décroît dans le temps avec la décroissance radioactive de ces déchets ;
- les phénomènes hydrauliques, liés aux écoulements d'eau naturelle dans le milieu géologique, et aux phénomènes de désaturation-resaturation des ouvrages de stockage et de production de gaz au sein du stockage ;
- les phénomènes mécaniques induits notamment par le creusement des ouvrages ;
- les phénomènes chimiques qui concernent l'évolution des matériaux constituant les composants du stockage (à court et long terme) sous l'influence notamment des interactions avec l'eau du Callovo-Oxfordien (écoulement de cette eau dans les ouvrages et échanges de matière en solution entre le Callovo-Oxfordien et les ouvrages) ;
- les phénomènes de transport des radionucléides et des toxiques chimiques au sein du milieu géologique, notamment le Callovo-Oxfordien, et des ouvrages de stockage, jusqu'aux exutoires potentiels.

3

Cadre réglementaire et référentiels

3.1	<i>La réglementation applicable au projet Cigéo</i>	44
3.2	<i>Les guides et référentiels techniques</i>	44
3.3	<i>Les standards et pratiques internationaux</i>	45
3.4	<i>La prise en compte de références nationales et internationales</i>	46

3.1 La réglementation applicable au projet Cigéo

Au-delà de la loi de 2006, la réglementation applicable à Cigéo couvre des codes, décrets, arrêtés, textes de décisions. Par ailleurs, suite à la loi relative à la transparence de la sûreté nucléaire [TSN] du 13 juin 2006 (14) et à la publication de l'arrêté du 7 février 2012 (15), l'ASN a démarré un processus de déclinaison de cet arrêté en décisions. Certaines décisions sont publiées et applicables à Cigéo entièrement ou pour partie. D'autres sont encore en cours d'établissement. Elles sont listées à titre indicatif ; leur prise en compte dans le dossier de demande d'autorisation de création dépendra de leur publication et de leur domaine d'application. Le tableau en Annexe 3 : synthétise les textes retenus pour Cigéo.

3.2 Les guides et référentiels techniques

3.2.1 Guides et règles fondamentales de sûreté : cas spécifique du Guide ASN-2008

A l'exception du 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 (1), les règles fondamentales de sûreté (RFS) et les guides relatifs aux installations nucléaires de base sont établis pour les installations nucléaires de surface et donc la phase de vie exploitation de Cigéo. Ils sont donc considérés non applicables pour la phase de vie après fermeture de Cigéo.

Seul 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 (1) est considéré applicable pour Cigéo après fermeture. Ce guide 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 peut pas être maintenu de façon certaine au-delà d'une période limitée. »

En conséquence, les options de sûreté et de conception retenues pour Cigéo sont établies pour répondre aux fonctions de sûreté et exigences associées mentionnées dans le guide.

Le guide de sûreté du stockage géologique (1) formule aussi des recommandations sur les scénarios demandant notamment de justifier leur choix. Le volume III du présent document s'attache ainsi à présenter les scénarios qui sont retenus, leur classification et la raison de ces choix. Concernant le cas particulier de l'intrusion humaine, conformément au guide les évaluations sont réalisées en considérant que l'intrusion se produit directement après la perte supposée de la mémoire du site (500 ans).

3.2.2 Référentiel complémentaire Andra

Concernant l'évaluation des conséquences, l'Andra suit aussi les recommandations du guide de sûreté ASN 2008 (1) préconisant d'identifier un groupe de référence hypothétique et d'identifier les exutoires potentiels. Dans son volume III, l'Andra présente donc les choix retenus en matière de sûreté pour évaluer les conséquences.

En complément de ce guide, l'Andra a établi pour la sûreté après fermeture et plus particulièrement en vue d'évaluer les conséquences pour l'homme, une note citée en référence (16) précisant la démarche de choix et de description d'une ou plusieurs biosphères tenant compte du retour d'expérience des dossiers précédents et instructions associées ainsi que des pratiques à l'international.

Cette démarche est synthétisée au chapitre 5 du présent volume.

3.3 Les standards et pratiques internationaux

La démarche de sûreté retenue par l'Andra suit les textes relatifs à la sûreté, émis par les organismes internationaux (standards de sûreté de l'AIEA, SRL de WENRA, brochures de l'OCDE) qui fixent des principes et permettent le dialogue avec la communauté internationale, en établissant des références communes à tous.

Il est à noter que les options de sûreté retenues pour Cigéo répondent notamment au principe établi par l'AIEA dans ses prescriptions de sûreté particulières SSR-5 qui mentionne dans son article « 2.17. *L'objectif primordial du stockage définitif des déchets radioactifs est de protéger les personnes et l'environnement à long terme, après la fermeture de l'installation de stockage. Dans cette phase, il peut y avoir migration de radionucléides vers la biosphère accessible, dispersion de radionucléides dans la biosphère accessible et exposition consécutive de personnes. C'est une conséquence de la lente dégradation des composants artificiels et de la lente migration de radionucléides à partir de l'installation du fait de processus naturels.* ». Ainsi les volumes II et III s'attachent à présenter la déclinaison de ce principe.

Les développements de la réflexion internationale (« Post-closure safety case for geological repositories », OCDE/AEN, Paris 2004 ; « The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste », AIEA SSG-23, Vienne 2012) insistent par ailleurs 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, intégrant les acquisitions de connaissances sur les « données d'entrée » des projets de stockage et la conception de ces projets. Pour y répondre et tracer les arguments, la démarche d'évaluation mise en place par l'Andra comprend les trois piliers suivants :

- une analyse fonctionnelle (fonctions, composants et performances associées) établissant un lien fort avec la conception ;
- une analyse phénoménologique des situations de stockage (état de la connaissance prenant en compte les options de conception retenues) ;
- une analyse qualitative des incertitudes (qui s'appuie sur les deux premières analyses) complétée par une quantification des scénarios retenus à l'issue de l'analyse.

L'Andra s'est aussi référée aux textes en vigueur de la CIPR pour les questions relatives à la protection radiologique qui fixe notamment les limites et contraintes en matière de dose. Les objectifs de protection retenus par l'Andra et présentés dans le chapitre 4 du volume I sont cohérents avec les recommandations de la CIPR.

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, EG-DTP), de l'AIEA (GEOSAF, HIDRA...) et de l'OCDE/AEN (INTESC, EBS, AMIGO, MeSa, workshop scenarios...) a permis à l'Andra de se comparer à ses homologues à l'international et de vérifier que les approches étaient similaires.

Les publications de l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) établissent l'état de l'art dans différents domaines. Plusieurs documents traitent du stockage profond de déchets radioactifs. Parmi ces documents, un certain nombre traitent des liens entre les thèmes de recherche, la conception de l'installation et sa démonstration de la sûreté de l'installation. Seuls sont cités dans ce chapitre les documents relatifs à la démonstration de sûreté.

Concernant les scénarios, la démarche retenue par l'Andra permet d'identifier les scénarios qui correspondent à une déviation de l'évolution normale du système de stockage. Elle est cohérente avec les standards et les pratiques internationales. Elle répond notamment à l'article DI-36 du document établi par WENRA en décembre 2014 qui indique : « *The licensee shall design the disposal facility giving due consideration to both normal evolution of the disposal system after closure and scenarios involving events and processes that might disturb the normal evolution of the disposal system* ».

Concernant le cas particulier des actions humaines, d'après le guide DS 355 de l'AIEA¹² :

- les activités humaines pouvant conduire à une intrusion dans un stockage de profondeur supérieure à 30 m sont généralement liées à des activités de forage ;
- les conséquences d'un ou plusieurs scénarios d'intrusion doivent être évaluées ;
- compte tenu des nombreuses incertitudes liées à la définition de scénarios impliquant les évolutions futures des sociétés, les scénarios devront être construits de manière « stylisée », c'est-à-dire simplifiée tout en restant « majorants » en termes d'estimation des impacts.

Les tableaux présentés en annexes 2 et 3 listent les principaux documents considérés pour le projet Cigéo en distinguant les standards des documents techniques.

3.4 La prise en compte de références nationales et internationales

L'Andra s'attache à prendre en compte les références nationales indiquées dans le présent chapitre. A ce titre les trois fonctions de sûreté du guide de sûreté ASN-2008 (1) sont déclinées en sous-fonctions et exigences associées dans le volume II du présent document.

Cette déclinaison se fonde ainsi sur une approche multifonctions de la sûreté associée à la vérification du bon niveau de performance de ces fonctions.

Les participations de l'Andra à des exercices internationaux permettent aussi de s'assurer que la stratégie de sûreté retenue par l'Andra est cohérente avec ces références et pratiques.

¹² Le guide DS 355 de l'AIEA précise que lorsque l'intrusion est volontaire, il est considéré que les personnes en charge de l'action sont conscientes et responsables des conséquences potentielles sur le stockage. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'évaluer la situation dans les analyses de sûreté.

4

Stratégie de sûreté

4.1	<i>Les principes fondamentaux</i>	48
4.2	<i>Les Fonctions de sûreté après fermeture, principes généraux de conception et exigences applicables</i>	49
4.3	<i>Les objectifs de protection</i>	55
4.4	<i>La démarche globale</i>	56

4.1 Les principes fondamentaux

La démarche de sûreté mise en œuvre pour Cigéo suit les recommandations du guide de sûreté du stockage géologique (1) qui mentionne « *les objectifs qui doivent être retenus dès les phases d'investigations d'un site et de conception de l'installation d'un stockage, pour permettre d'assurer la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage* ». Ce guide (désigné dans la suite « Guide de sûreté du stockage géologique ») stipule que (§ 4.1, Objectifs) :

- « 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 ou 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 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. »
- « A cet égard, le concept retenu pour le stockage devra permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques, et des facteurs économiques et sociaux ».

Les fonctions de sûreté après fermeture et les exigences associées sont identifiées, prises en compte dès la conception et vérifiées tout au long de la phase de construction et d'exploitation.

Le système de stockage repose particulièrement sur le Callovo-Oxfordien, barrière naturelle jouant le rôle principal, et les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond, qui assurent une sûreté passive après fermeture et sur le long terme.

Le bon fonctionnement du système de stockage et plus particulièrement la satisfaction des fonctions de sûreté sont vérifiés au travers d'indicateurs (cf. chapitre 5), l'objectif de protection étant vérifié par une évaluation d'impact exprimée en termes de dose.

Un niveau approprié de contrôle et de surveillance est appliqué à Cigéo dès sa construction puis pendant son exploitation afin de s'assurer de la protection et de la préservation des dispositifs de sûreté passive après fermeture, en tant que de besoin, de façon à ce qu'ils puissent remplir leurs fonctions de sûreté après fermeture. Ce niveau sera précisé dans le cadre du rapport de sûreté en support à la demande d'autorisation de création. Le Volume IV du présent document fournit quelques préconisations.

Le concept de stockage, en particulier l'architecture de l'installation souterraine, retenu au stade d'avant-projet sommaire, pourra évoluer pour prendre en compte l'avancée des connaissances scientifiques et technologiques. Il sera vérifié pour chaque évolution envisagée que les fonctions de sûreté après fermeture restent satisfaites et que l'impact radiologique reste à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en regard des facteurs économiques et sociaux.

La démarche globale retenue pour l'évaluation de sûreté après fermeture repose sur une déclinaison des fonctions de sûreté et des exigences associées, une analyse des performances des composants ainsi qu'une analyse des incertitudes sur les connaissances scientifiques et technologiques qui supportent la conception. Celles-ci sont présentées aux volumes II et III du présent document.

4.2 Les Fonctions de sûreté après fermeture, principes généraux de conception et exigences applicables

4.2.1 Les fonctions principales

Afin de répondre à l'objectif fondamental de protection des personnes et l'environnement contre les risques liés à la dissémination des substances radioactives et des toxiques chimiques, contenus dans les déchets, l'Andra identifie et organise comme suit les fonctions de sûreté du système de stockage Cigéo en après fermeture.

La première fonction de sûreté consiste à isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines. Le site et la profondeur d'implantation retenus préservent le stockage des phénomènes de surface, de l'érosion ainsi que des activités humaines banales qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur de terrain inférieure à 200 m. Suivant le guide de sûreté du stockage géologique (1), la protection des personnes doit être assurée « sans dépendre d'un contrôle institutionnel sur lequel on ne peut pas se reposer de façon certaine au-delà d'une période limitée (...) (500 ans) ». La mémoire du stockage sera maintenue le plus longtemps possible. La solution technique retenue permettra une confiance raisonnable dans sa pérennité, permettant de ne pas considérer l'éventualité d'une intrusion humaine involontaire avant 500 ans, conformément au guide de sûreté (1).

La deuxième fonction de sûreté consiste à limiter le transfert jusqu'à la biosphère des substances radioactives et toxiques chimiques contenus dans les déchets. Cela implique de maîtriser la dégradation physico-chimique des déchets, des colis et des composants ouvragés, de retenir les substances radioactives et les toxiques chimiques au plus près de la source et de maîtriser les voies de transfert qui peuvent conduire à long terme ces éléments jusqu'à la biosphère à savoir :

- la voie aqueuse, les substances étant susceptibles d'être mises en solution puis de cheminer jusqu'à la surface ;
- la voie gazeuse, certains radionucléides pouvant migrer sous cette forme.

L'eau est le principal facteur d'altération des colis de déchets et le principal vecteur de transfert des substances radioactives et des toxiques chimiques. La maîtrise de la voie aqueuse constitue donc un objectif essentiel de la sûreté après fermeture.

La limitation du transfert des substances radioactives et toxiques chimiques par l'eau est déclinée en trois fonctions de sûreté suivantes (Figure 4.2-1) :

1. s'opposer à la circulation d'eau ;
2. limiter le relâchement des substances radioactives et des toxiques chimiques, et les immobiliser dans le stockage ;
3. retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques qui auraient été relâchés hors des colis puis des alvéoles de stockage.

Ces trois fonctions de sûreté s'appuient en premier lieu sur les caractéristiques favorables de la formation du Callovo-Oxfordien. La conception de Cigéo (architecture, composants ouvragés) et son exploitation visent à préserver ses caractéristiques favorables.

Si la formation du Callovo-Oxfordien joue un rôle central dans la sûreté sur le long terme, les colis et les composants ouvragés du stockage, plus particulièrement l'architecture à terminaison de l'installation souterraine, les ouvrages de fermeture, contribuent aussi au confinement des déchets et au maintien de conditions d'écoulements très lents dans l'installation.

Un objectif particulier consiste à maîtriser le risque de criticité lié à la présence d'isotopes fissiles dans les déchets. L'Andra vérifie la maîtrise de ce risque dans le cadre de l'évaluation de sûreté, sur la base de la masse de matière fissile par colis, de la répartition des colis de déchets dans les alvéoles et des possibilités limitées de déplacement et de concentration d'isotopes fissiles, en tenant compte de l'évolution des matériaux et des volumes vides dans les alvéoles.

4.2.2 La déclinaison de la fonction « limiter le transfert jusqu'à la biosphère »

4.2.2.1 S'opposer à la circulation d'eau

Les argilites du Callovo-Oxfordien sont initialement saturées en eau. La réalisation de l'installation de stockage perturbe les pressions hydrauliques et peut localement conduire à une désaturation des argilites au pourtour immédiat des ouvrages. Dans la période qui suit la fermeture de l'installation souterraine, un transitoire hydraulique se met en place sur des durées qui varient selon les ouvrages considérés, jusqu'à l'atteinte de la saturation totale du stockage et le retour à un nouvel état d'équilibre hydraulique du stockage et du Callovo-Oxfordien environnant. Au-delà, les écoulements suivent alors globalement le gradient hydrogéologique naturel (vertical montant ou descendant) dans le Callovo-Oxfordien sur la ZIRA.

Au cours de la période transitoire de saturation du stockage, la limitation des flux d'eau provenant des formations géologiques sus-jacentes traversées par les liaisons surface-fond remblayées et scellées permet de retarder une arrivée d'eau importante depuis les aquifères sus-jacents dans le stockage et jusqu'aux colis de déchets, et de s'assurer par ailleurs que la saturation des ouvrages est contrôlée majoritairement par l'eau provenant du Callovo-Oxfordien.

Après resaturation des ouvrages souterrains, on cherche à ce que le transfert par convection soit limité très fortement au sein du système de stockage, à savoir d'une part dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien qui a été choisie à cet effet pour sa faible perméabilité et le faible gradient hydraulique qui lui est appliqué, et d'autre part dans l'installation souterraine et les liaisons surface-fond.

Cela contribue à créer des conditions favorables aux deux autres fonctions permettant de limiter le transfert des substances radioactives ou toxiques chimiques par l'eau (limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage ; retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques) :

- un faible renouvellement d'eau dans les alvéoles de stockage contribue à protéger les colis de déchets et à favoriser la mise en place d'équilibres chimiques locaux ;
- une faible vitesse de transport des solutés le long des ouvrages souterrains favorise leur rétention par le Callovo-Oxfordien, au sein duquel leur transport se fera par diffusion dominante.

Pour s'opposer à la circulation d'eau dans le système de stockage, l'Andra retient donc les sous-fonctions suivantes :

- limiter les flux d'eau, en distinguant le flux d'eau venant de la formation hôte du Callovo-Oxfordien drainé par l'installation souterraine, et le flux d'eau circulant via les liaisons surface-fond entre le stockage et les formations aquifères sus-jacentes (comme les calcaires du Barrois et les horizons poreux de l'Oxfordien carbonaté) ;
- limiter les vitesses de circulation de cette eau, depuis les alvéoles jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien par les ouvrages de liaison surface-fond.

Les dispositions de conception adoptées pour réaliser ces sous-fonctions sont développées au volume II.

4.2.2.2 Limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage.

Pour limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage, l'Andra retient les trois sous-fonctions suivantes (Figure 4.2-1):

- protéger les déchets de l'eau ;
- limiter la mise en solution des radionucléides et des éléments toxiques chimiques ;
- limiter la mobilité des radionucléides et des éléments toxiques chimiques.

Protéger les déchets de l'eau

Certains déchets sont conditionnés dans une matrice durable qui les isole de l'eau : c'est particulièrement le cas du verre nucléaire utilisé pour les déchets HA. Pour d'autres déchets, c'est la

nature même du déchet dans lequel sont des radionucléides qui isole tout ou partie de ces derniers de l'eau : il s'agit par exemple des déchets métalliques activés, notamment les coques des crayons des assemblages de combustibles usés après retraitement.

On cherche à mettre à profit autant que possible les propriétés favorables des déchets conditionnés, en tenant compte des contraintes techniques. Cela implique d'une part de maîtriser ces propriétés, et d'autre part de constituer dans les alvéoles un environnement physico-chimique retardant l'altération des déchets et des matrices de conditionnement. Des conditions réductrices sont ainsi favorables à la protection des métaux. Des conditions alcalines sont évitées au voisinage des déchets HA vitrifiés car elles tendent à accélérer la dissolution de la matrice verre. A contrario un pH basique est plutôt favorable à de faibles cinétiques de corrosion des déchets métalliques.

Limiter la mise en solution des radionucléides et des éléments toxiques chimiques

Pour limiter la mise en solution des substances accessibles à l'eau dans les déchets (cas d'une contamination radioactive de surface des déchets, caractéristique par exemple des déchets technologiques) ou relâchées à la suite de l'altération des déchets, on cherche à disposer de conditions physico-chimiques à même de les précipiter dans les alvéoles, au plus près des déchets, notamment :

- un milieu argileux réducteur, tamponné par le Callovo-Oxfordien, limite la solubilité d'un grand nombre de radionucléides, notamment les actinides, le technétium... ;
- des conditions cimentaires sont aussi favorables à une faible solubilité d'une grande majorité des radionucléides (par exemple le nickel, le cobalt, l'américium, le curium, le neptunium, le plutonium).

La température intervient sur la solubilité des radionucléides et des éléments toxiques. L'Andra a choisi d'éviter tout contact entre les déchets et l'eau lorsque la température dans les déchets et leur environnement est supérieure à 70 °C. Le stockage est ainsi maintenu dans un domaine où le comportement des radionucléides et toxiques chimiques est maîtrisé (solubilité et rétention à l'interface solide/liquide). Cela passe par l'adoption d'un conteneur de stockage étanche pour les déchets HA, et par une limitation de la température dans les alvéoles pour les autres déchets (voir le volume II).

Limiter la mobilité des radionucléides et des éléments toxiques chimiques

Des phénomènes de complexation peuvent modifier la mobilité des radionucléides et des éléments toxiques dans le système de stockage, en augmentant leur solubilité apparente. Certaines matières organiques, et éventuellement certains sels, contenus dans une partie des colis de déchets MA-VL ou issus de leur dégradation sont susceptibles de former des espèces complexantes de radionucléides et d'éléments toxiques.

Par ailleurs, des sels contenus dans certains déchets MA-VL peuvent modifier les conditions redox dans le Callovo-Oxfordien en champ proche et ainsi de favoriser le transport en solution de certains radionucléides.

Aussi, afin de limiter les conséquences des phénomènes précités, l'Andra a défini des dispositions de conception restrictives en matière de co-stockage : définition des colis de déchets, plus particulièrement MA-VL, susceptibles d'être placés dans un même alvéole (dispositions traitées notamment dans les caractéristiques dimensionnantes du volume II du DOS-Expl), et distances minimales entre des alvéoles contenant des types de déchets différents susceptibles d'interagir entre eux (cf. volume II du présent document).

De même la présence de matériaux ouvragés employés dans le stockage et pouvant produire des espèces en solution augmentant la mobilité des radionucléides et des éléments toxiques est limitée autant que possible.

4.2.2.3 Retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques

Si le système de stockage privilégie le confinement des substances radioactives et toxiques chimiques au plus près des déchets en limitant leur relâchement hors des colis puis des alvéoles, il doit aussi

retarder et atténuer la migration de celles qui auront été néanmoins relâchées hors des alvéoles dans le Callovo-Oxfordien, particulièrement les substances les plus solubles et les plus mobiles.

Atténuer la migration doit se comprendre dans une double acception, à la fois dans le temps et dans l'espace. La migration d'une quantité de radionucléides ou de toxiques chimiques conduira un impact d'autant moindre que cette quantité se dispersera sur une plus grande distance et que l'atteinte de la biosphère se fera de manière répartie et sur une période plus longue. L'augmentation du temps de transfert de substances radioactives vers la surface pourra ainsi réduire leur impact par décroissance radioactive au cours de la migration, en regard de leur période radioactive vs le temps de migration.

Pour assurer cette fonction, on cherche à mobiliser préférentiellement le Callovo-Oxfordien, comme voie de transfert privilégiée. Il est alors possible d'optimiser le retard et l'atténuation de la migration au sein du Callovo-Oxfordien, en exploitant au mieux son épaisseur et ses capacités de rétention, tout en tenant compte des contraintes techniques de réalisation des installations fond de Cigéo au sein du Callovo-Oxfordien.

Cela suppose corollairement de réduire autant que possible le flux de substances radioactives et de toxiques chimiques susceptibles de sortir du système de stockage via les liaisons surface-fond. Un ensemble de dispositions géométriques soit adopté pour retarder et atténuer ce flux dans les alvéoles, les galeries d'accès et de liaison, jusqu'aux liaisons surface-fond : elles sont développées au volume II.

Enfin, on tire profit autant que possible de la capacité naturelle de dispersion et de dilution des formations encaissantes du Callovo-Oxfordien, bien qu'elles ne relèvent pas du système de stockage sensu stricto.

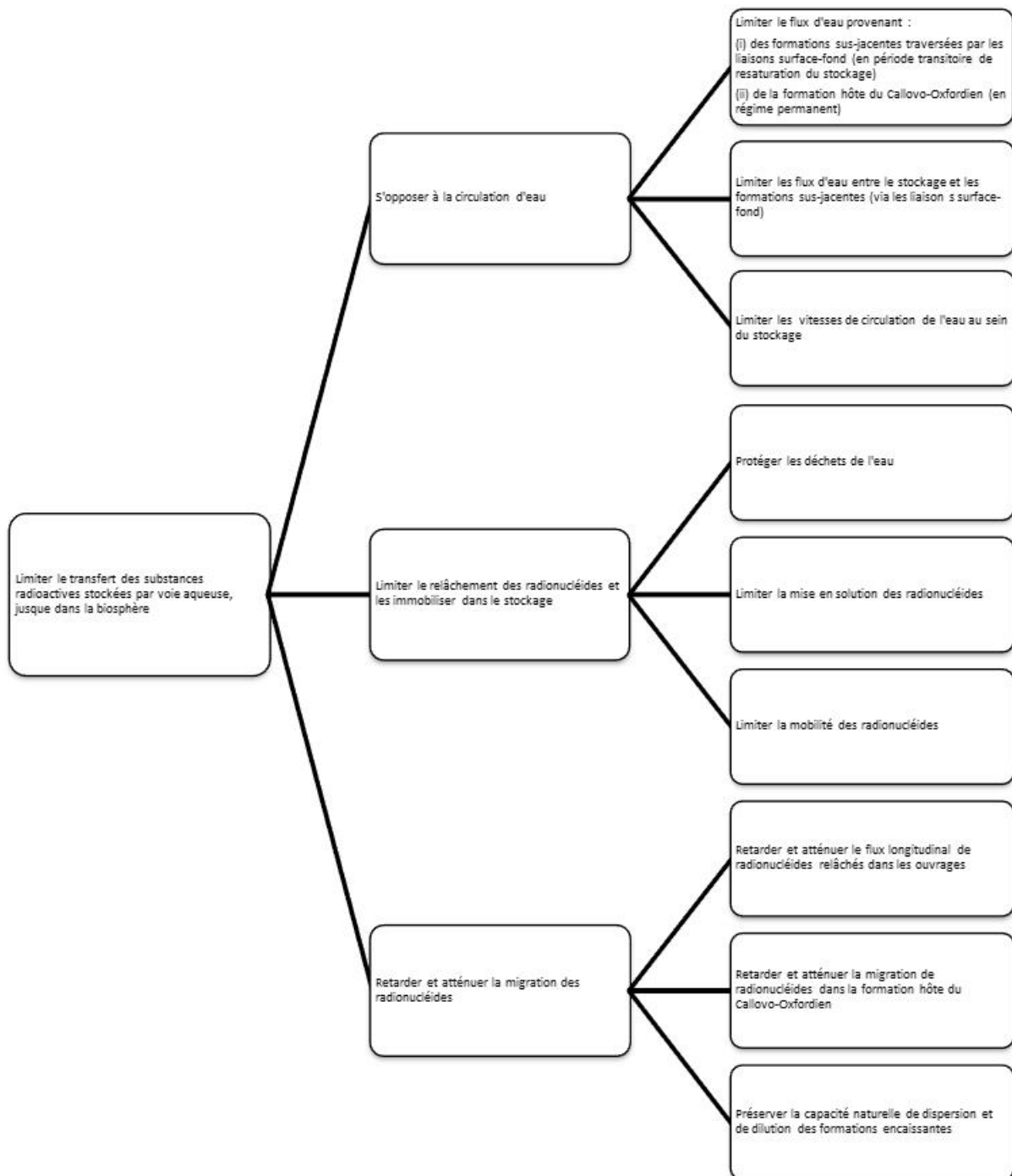


Figure 4.2-1 : Arborescence des fonctions permettant de limiter le transfert des substances radioactives (et toxiques chimiques) par voie aqueuse

4.2.3 Les principes généraux de conception

Pour répondre aux fonctions de sûreté après fermeture, l'Andra retient un ensemble de principes généraux de conception de Cigéo et pour le choix de son site. Ces principes concernent aussi la construction et l'exploitation de Cigéo une fois obtenues les autorisations de création puis de mise en service. Le tableau suivant présente les principes retenus spécifiquement à chaque fonction de sûreté après fermeture.

Fonctions de sûreté après fermeture	Principes généraux en termes de choix de site et de conception
Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines	<ul style="list-style-type: none"> • Implantation de Cigéo en profondeur et dans une zone à géodynamique faible et homogène ⇒ le système de stockage se trouve à l'écart des phénomènes d'érosion et par conséquent protégé durablement des intrusions humaines banales ; • Absence de ressources souterraines extractibles et géothermales exceptionnelles susceptibles de susciter des travaux de prospection ; • Maintien de la mémoire du stockage le plus longtemps possible après sa fermeture¹³.
S'opposer à la circulation d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Faible écoulement d'eau dans le Callovo-Oxfordien du fait de sa faible perméabilité et d'un faible gradient de charge hydraulique qui lui est appliqué dans la ZIRA ; • Localisation du système de stockage dans une zone située à l'écart des structures géologiques (potentiellement) hydrauliquement actives ; • Regroupement et scellement des liaisons surface-fond ⇒ les circulations d'eau potentielles via ces liaisons sont minimisées ; • Quartiers de stockage « borgnes » par rapport au reste de l'installation souterraine ⇒ les flux d'eau au sein du stockage sont limités, en sollicitant les faibles flux d'eau au sein du Callovo-Oxfordien.
Limiter le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage	<ul style="list-style-type: none"> • Alvéoles (particulièrement les matériaux employés) visant à protéger les déchets et les colis d'un point de vue physico-chimique ⇒ l'altération est limitée autant que possible ; • Conditions physico-chimiques dans les alvéoles limitant le relâchement et la mobilité des substances radioactives et toxiques chimiques (choix des matériaux employés ; éloignement de certains colis de déchets en fonction des perturbations qu'ils sont susceptibles d'induire ou de la sensibilité des substances qu'ils contiennent ; caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien : faibles écoulements d'eau, chimie de l'eau réductrice, transport par diffusion dominant...).
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	<ul style="list-style-type: none"> • Épaisseur importante (au moins 130 m sur la ZIRA), capacité de rétention élevée et eaux interstitielles neutres et réductrices du Callovo-Oxfordien ⇒ les concentrations en solution des substances radioactives et toxiques chimiques contenues dans les déchets sont limitées et la migration des espèces en solution est lente ⇒ effet de dilution dans le temps et l'espace pour les substances radioactives et toxiques chimiques les plus mobiles ; • Implantation de l'installation souterraine dans la partie médiane du Callovo-Oxfordien en tenant compte des contraintes techniques de construction et d'exploitation, architecture planaire de l'installation ⇒ les épaisseurs des gardes inférieure et supérieure du Callovo-Oxfordien de part et d'autre de l'installation fond de Cigéo sont élevées ; • Géométries des alvéoles et des galeries de l'installation souterraine optimisées, particulièrement leurs longueurs ⇒ la migration des substances radioactives et toxiques chimiques le long des ouvrages est limitée et la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est privilégiée.

D'une manière plus générale, la conception de Cigéo, depuis le choix des grandes options jusqu'aux solutions techniques de détail, est guidée par la recherche des meilleures techniques disponibles qui permettent de répondre aux fonctions de sûreté, en tenant compte des contraintes techniques et économiques.

¹³ à minima sur 500 ans

La maîtrise de l'évolution du système de stockage sur le long terme et de son impact sur les fonctions de sûreté repose sur une maîtrise phénoménologique robuste des processus auxquels cette évolution est associée. Cela conduit à :

- limiter autant que possible les perturbations physiques et physico-chimiques induites sur la formation du Callovo-Oxfordien ainsi que sur les formations encaissantes, notamment celles sus-jacentes traversées par les liaisons surface-fond. Cela permet de s'appuyer autant que possible sur leurs caractéristiques initiales bien caractérisées, notamment grâce au Laboratoire souterrain, pour réaliser les fonctions de sûreté ;
- limiter autant que possible les interactions physiques et physico-chimiques au sein du stockage, dans une optique de simplification des processus à prendre en compte ;
- utiliser autant que possible des matériaux et des solutions techniques simples, robustes et éprouvés. En particulier l'Andra privilégie l'emploi de matériaux naturels pour les ouvrages de fermeture.

4.2.4 Les exigences applicables à la conception de Cigéo

A l'ensemble des fonctions de sûreté après fermeture sont associées des exigences mises en application pour la conception de Cigéo et que l'Andra a rassemblées dès 2011.

Ces exigences reprennent les textes réglementaires et les guides de sûreté directement applicables à Cigéo (cas du guide de sûreté du stockage géologique (1)). De plus des référentiels de sûreté bâtis par l'Andra en adaptant les textes et pratiques non directement applicables à Cigéo (cas du référentiel incendie) sont associés aux exigences.

Les exigences applicables au projet Cigéo consolident également les autres besoins et recommandations exprimés par les parties prenantes (État, ASN, CNE, producteurs de déchets HA et MA-VL, acteurs locaux).

Les exigences reposent sur l'expérience acquise par l'Andra dans le Laboratoire souterrain et plus généralement par l'ensemble des études et recherches menées depuis 1991. Cela a permis notamment de traduire les objectifs de sûreté sur le long terme en options de conception constituant des données d'entrée pour les études confiées aux maîtrises d'œuvre et pour les essais.

4.3 Les objectifs de protection

4.3.1 L'objectif de protection radiologique

Conformément au guide de sûreté (ASN, 2008) (1) :

- l'Andra retient la valeur de contrainte de dose de 0,25 mSv/an en scénario d'évolution normale ;
- pour les scénarios d'évolution altérée et d'intrusion humaine involontaire, l'Andra vérifie que les conséquences restent à un niveau inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

La dose calculée à long terme reste une valeur de référence de l'impact sur une population théorique a priori la plus exposée.

L'Andra retient comme principal indicateur de protection radiologique, la dose efficace engagée à l'exutoire. Conformément à la CIPR 81, elle est un indicateur de l'impact mais ne constitue pas pour autant une valeur prédictive. D'autres indicateurs sont utilisés, pour vérifier les performances du système de stockage : ils sont présentés dans le chapitre 5 du présent volume.

L'impact s'apprécie en tenant compte de la vraisemblance de la situation, du caractère chronique ou ponctuel des expositions, du degré de pessimisme des hypothèses de l'évaluation 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.

4.3.2 L'objectif de protection vis-à-vis des toxiques chimiques

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

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. Pour ce qui concerne le risque chimique, du fait que les fonctions de sûreté sont de même nature (empêcher et retarder le transfert d'éléments chimiques jusqu'à l'environnement), les solutions apportées au problème posé par les substances radioactives couvrent en règle générale celles pour les toxiques chimiques. L'Andra évalue l'impact chimique du stockage de manière générale et se concentre, pour les évaluations quantitatives, sur quelques toxiques chimiques sélectionnés de manière à couvrir ceux qui sont les plus pénalisants. Il s'agit de : arsenic, bore, béryllium, cadmium, chrome (III) et (VI), mercure inorganique et organique, nickel, plomb, antimoine, sélénium, uranium, amiante.

Par cohérence avec la démarche d'évaluation des risques sanitaires associés aux toxiques 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 pour les éléments à effets cancérogènes, et de quotient de danger (QD^{14}) pour les éléments à effets non cancérogènes. Cette approche s'applique aux scénarios d'exposition chronique (sur plusieurs années).

4.4 La démarche globale

4.4.1 L'approche coordonnée entre sûreté en exploitation et sûreté après fermeture

Une démarche permettant d'intégrer les évolutions de conception tout au long du développement de Cigéo, tout en garantissant la sûreté après fermeture.

Dans le cadre d'un processus itératif, toute évolution de solutions techniques sur les ouvrages de fermeture ou toute évolution de l'architecture à terminaison fera l'objet d'un examen en utilisant le(s) indicateur(s) le(s) plus pertinent(s) permettant de vérifier que la performance et la sûreté restent garanties.

Cette démarche relie la sûreté en exploitation et la sûreté après fermeture. Elle permet ainsi de gérer les pistes d'optimisations et évolutions techniques envisagées pour Cigéo sur sa durée d'exploitation et le retour d'expérience de l'exploitation, ainsi que d'intégrer toute évolution de la réglementation et des pratiques au niveau national et international tout en garantissant le principe de défense en profondeur.

L'opportunité de retenir de nouvelles solutions techniques pour la conception du système de stockage sera ainsi confirmée sur la base de l'analyse de leur compatibilité avec une exploitation sûre de l'installation et du respect des exigences de sûreté après fermeture.

Bien que la fermeture définitive de Cigéo intervienne à une période séculaire après le début de son exploitation, l'Andra a mis en place un processus permettant d'intégrer les exigences de sûreté après

¹⁴ 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.

fermeture dès la conception et de vérifier la satisfaction de ces exigences au travers d'un processus itératif dans le cadre du développement progressif du stockage (cf. Figure 4.4-1).

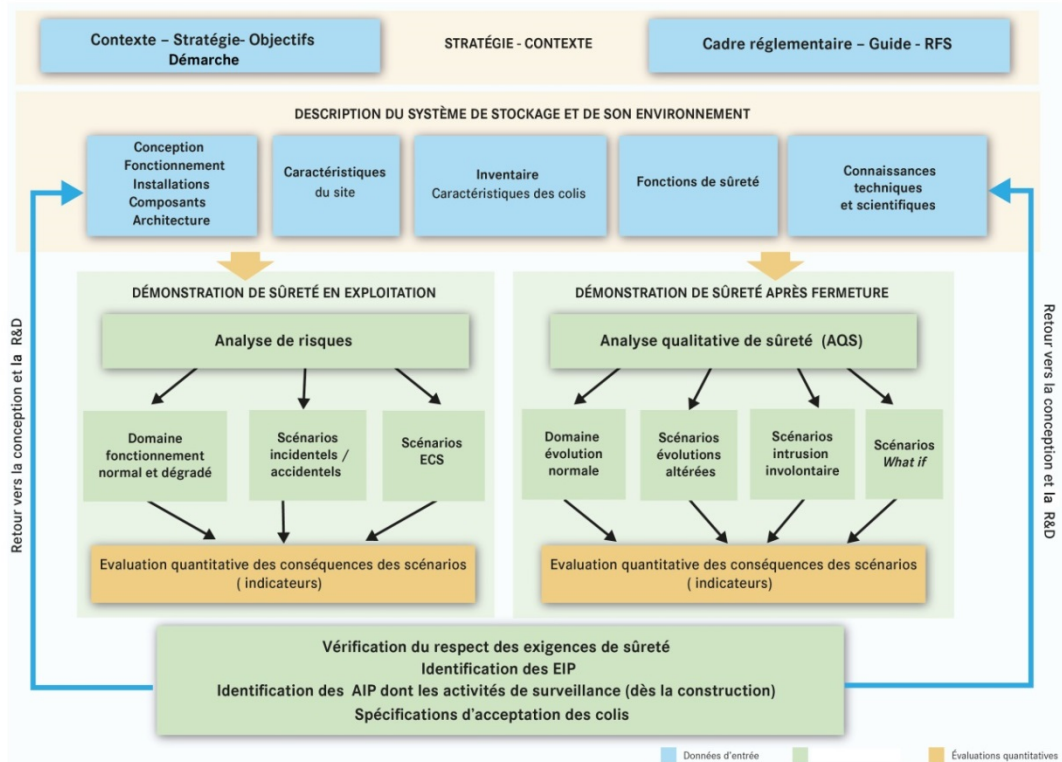


Figure 4.4-1 : Schéma illustrant l'approche coordonnée entre la sûreté en exploitation et après fermeture

La démarche consiste à :

- l'identification des référentiels, des réglementations et des positions d'évaluateurs, les pratiques nationales et internationales qui orientent les choix et les principes de conception et qui encadrent l'analyse de sûreté ;
- l'identification des fonctions de sûreté après fermeture ;
- l'établissement de l'état de la connaissance :
 - ✓ des colis de déchets (inventaire et caractéristiques), et du milieu géologique du site ;
 - ✓ de l'installation à terminaison et son implantation dans le Callovo-Oxfordien ;
 - ✓ des solutions techniques s'appuyant notamment sur des démonstrateurs ;
 - ✓ des matériaux, et la compréhension scientifique de l'évolution à long terme du système de stockage (composants ouvragés et formation hôte) et de son environnement (formations encaissantes, biosphère) prenant en compte les processus Thermique, Hydraulique-Gaz, Mécanique, Chimique et Radiologique (TH-G-M-C-R) 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 au Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne ;
- l'étape d'évaluation qui doit montrer que les choix de conception satisfont les fonctions de sûreté au travers de :
 - ✓ l'analyse de sûreté en exploitation du stockage qui s'appuie notamment sur l'analyse des risques et la mise en place le cas échéant des dispositions de prévention et de protection nécessaires pour réduire ces risques ;
 - ✓ l'analyse de sûreté après fermeture qui s'appuie notamment sur l'analyse des incertitudes après fermeture au travers de l'analyse qualitative de sûreté qui 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.

4.4.2 L'application du principe de défense en profondeur à la sûreté après fermeture

L'application du principe de défense en profondeur mise en œuvre pour la phase après fermeture est adaptée à la spécificité de Cigéo par rapport à d'autres installations nucléaires et en particulier au fait que la sûreté après fermeture repose sur un système « passif » sans possibilité d'intervention pouvant s'étaler sur de très longues durées.

Le principe de défense en profondeur est ainsi décliné pour la phase après fermeture selon les principes suivants :

- Au premier niveau, vis-à-vis des dispositions de prévention :
 - ✓ diverses fonctions de sûreté complémentaires sont attribuées aux différentes classes de composants du système afin de permettre ainsi un certain niveau de redondance des fonctions de sûreté de telle sorte que des défaillances plausibles de composants ne compromettent pas, à elles seules, la sûreté de l'installation ;
 - ✓ les fonctions sont assurées pendant une durée suffisante, compte tenu de leurs rôles respectifs dans la sûreté globale du stockage et de la décroissance des radionucléides contenus dans les déchets. La durée et la qualité du confinement sont définies en fonction de la nature du déchet ;
 - ✓ les fonctions de sûreté reposant sur les caractéristiques de la formation du Callovo-Oxfordien, composant principal du système de stockage, sont préservées, malgré les effets dus aux événements géologiques susceptibles de se produire, tant que la dissémination de l'activité résiduelle des déchets stockés est susceptible d'entraîner des expositions individuelles inacceptables lors de tels événements : formation du Callovo-Oxfordien localisée en profondeur et donc à l'abri des aléas externes d'origine humaine (chute d'avion, chantiers, forages en surface...) ou naturelle (érosion, climat...) ; formation stable d'un point de vue sismique ;
 - ✓ les solutions techniques retenues s'appuient sur des technologies éprouvées. Aussi, les options retenues à ce stade sont fondées sur une approche prudente. Elles pourront évoluer d'ici la fermeture du stockage (pistes d'optimisations) au regard du retour d'expérience des autres exploitations nucléaires et minières, des démonstrateurs au Laboratoire souterrain, du retour d'expérience de la phase industrielle pilote, puis pendant l'exploitation ainsi que de l'avancée des connaissances technologiques et scientifiques ;
 - ✓ les performances dans le temps des différents composants du système de stockage sont vérifiées vis-à-vis des fonctions de sûreté qu'ils ont à satisfaire.
- Au deuxième niveau, pour maîtriser l'évolution normale du système de stockage après sa fermeture :
 - ✓ dès la conception, des exigences et paramètres importants pour la sûreté après fermeture sont identifiés et nécessitent un contrôle et une surveillance en construction et pendant l'exploitation ;
 - ✓ toute dérive observée avant la fermeture est analysée et son impact sur le respect des performances attendues des composants nécessaires à la sûreté après fermeture et sur l'impact global en termes de dose est évalué.
- Au troisième niveau, pour tester le système multi fonctions et l'apport des composants du système de stockage :
 - ✓ dès la conception du stockage, l'éventualité de défaillances est envisagée. La conception vise à en limiter les occurrences en tant que possible et raisonnable. Les études de sûreté après fermeture du stockage intègrent dès la conception l'éventualité de dysfonctionnements des ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond dans le cadre de scénarios d'évolution altérée pour en évaluer les conséquences et vérifier qu'elles restent acceptables au regard des objectifs de protection.
- Au quatrième niveau, pour évaluer la robustesse du système de stockage :
 - ✓ des facteurs aggravants sont pris en compte notamment dans le cadre de scénarios dits « *What-if* » dont on évalue les conséquences.

5

L'évaluation de sûreté

5.1	<i>Les objectifs visés</i>	60
5.2	<i>La cohérence avec les pratiques internationales</i>	60
5.3	<i>Les étapes de l'évaluation</i>	61
5.4	<i>L'analyse qualitative des incertitudes et risques</i>	61
5.5	<i>Les scénarios</i>	63
5.6	<i>L'évaluation quantitative des scénarios</i>	65

5.1 Les objectifs visés

Conformément au guide de sûreté du stockage géologique (1), afin de vérifier la satisfaction des fonctions de sûreté par le système de stockage ainsi que le respect des objectifs de protection, l'Andra structure l'évaluation de sûreté autour de trois objectifs [2] :

- la vérification du caractère favorable, pour la sûreté, des performances des composants du système de stockage censés participer aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, Callovo-Oxfordien), puis dans leur ensemble. Le rôle complémentaire des différents composants du système de stockage est apprécié notamment en montrant qu'en cas de dysfonctionnement d'un composant ouvragé de l'installation, le système de stockage satisfait l'objectif de protection ;
- l'évaluation des perturbations apportées dans le système de stockage par les interactions entre ses différents composants et l'estimation des conséquences de ces perturbations sur la réalisation des fonctions de sûreté, compte tenu des dispositions préventives et palliatives retenues dans la conception du système de stockage pour minimiser ces perturbations ou leurs effets ;
- la modélisation du comportement dans le temps du système de stockage pour un jeu de scénarios, ainsi que l'estimation des impacts associés à chacun de ces scénarios. Dans ce cadre, l'évaluation des expositions individuelles consiste à étudier un nombre limité de situations représentatives des différentes familles d'événements, de séquences ou de combinaisons d'événements, pour lesquelles les conséquences associées sont les plus élevées parmi l'ensemble des situations envisageables. Cette approche repose sur une sélection d'événements considérés comme raisonnablement envisageables et représentatifs des risques et incertitudes. Pour répondre au guide de sûreté du stockage géologique de 2008 (1), des situations altérées, en particulier l'occurrence d'événements naturels d'amplitude exceptionnelle (cycles climatiques, mouvements verticaux, séismes) et d'origine humaine (forages, défauts de conception ou de connaissances...) sont aussi envisagées.

5.2 La cohérence avec les pratiques internationales

Depuis les années 90, dans le cadre d'exercices internationaux qui ont démarré avec le projet PAGIS, l'Andra a pu se comparer régulièrement à ses homologues et s'assurer que la démarche de sûreté mise en œuvre était cohérente avec les pratiques internationales.

L'Andra reconduit notamment la démarche globale présentée dans le cadre de ses dossiers 2001 puis 2005 et évaluée par les pairs sous l'égide de l'AEN respectivement en 2002 et 2005.

Depuis le projet MeSA, un workshop tenu à Paris du 1^{er} au 3 juin 2015, sous l'égide de l'AEN, a permis aussi de faire un état de l'art sur les pratiques internationales en matières de développement et définition des scénarios.

Les conclusions de ce workshop soulignent que depuis 1999 (AEN Workshop on *Scenario Development*, tenu à Madrid), des développements méthodologiques pour la définition des scénarios ont été réalisés par de nombreuses organisations. Ces développements sont généralement motivés par des objectifs de « complétude de la liste des scénarios à considérer (« comprehensiveness »), de traçabilité des décisions, d'intégration logique et structurée des connaissances issues de diverses disciplines ». Depuis les dernières décennies, les développements méthodologiques ont ainsi pris en compte les incertitudes issues des connaissances scientifiques et techniques (FEP's) dans leur démarche d'identification des scénarios. Cela implique l'analyse des effets de ces incertitudes sur les fonctions de sûreté. Ces analyses aboutissent à une série de scénarios généralement regroupés en quatre classes génériques :

1. les scénarios qui visent à représenter l'évolution attendue du système de stockage en tenant compte d'événements ou processus certains ou très probables ;
2. des scénarios « d'évolution altérée » représentatifs d'événements ou processus moins probables mais plausibles. Se rangent dans cette classe les scénarios de dysfonctionnement des composants du système de stockage ;

3. des scénarios qualifiés de « *What-if* » reposant sur un caractère très peu vraisemblable des événements pris en compte, ou reposant sur des choix conventionnels pour considérer par exemple la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté. Ces scénarios permettent notamment de « pousser » à l'extrême certains dysfonctionnements et de montrer la robustesse du système de stockage dans sa globalité.
4. les scénarios d'intrusion involontaire.

Ce workshop a permis de s'assurer que la démarche de définition des scénarios et leur classification proposée par l'Andra était cohérente avec les pratiques internationales (17).

5.3 Les étapes de l'évaluation

Conformément à la Figure 4.4-1, l'évaluation de sûreté comprend notamment :

- l'analyse qualitative des incertitudes et risques de toutes natures pour en déduire les scénarios pertinents ainsi que leur classification ;
- l'évaluation quantitative des scénarios retenus.

L'analyse qualitative constitue la base fondamentale pour vérifier que les incertitudes et risques sont gérés en lien avec les fonctions de sûreté à satisfaire par les options de conception et/ou les scénarios.

Elle permet ainsi de montrer que :

- les défaillances plausibles de composants ne compromettent pas à elles seules la sûreté du stockage après sa fermeture ;
- les dispositions de conception retenues et les exigences applicables à la conception de Cigéo permettent d'en limiter l'occurrence et les conséquences.

La définition des scénarios constitue par ailleurs la base fondamentale pour les évaluations quantitatives et le choix de sûreté vis-à-vis des modèles et des données à retenir pour ces évaluations.

La performance globale et l'impact éventuel du stockage sur l'homme et l'environnement pour chaque scénario identifié sont évalués.

L'évaluation quantitative permet ainsi de porter un jugement sur les fonctions de sûreté du stockage et sur la robustesse d'ensemble du système et de vérifier que la sûreté après fermeture est toujours maîtrisée et que la protection de l'homme et de l'environnement est respectée.

Elle constitue une vérification a posteriori de la conception, en assurant que les fonctions attribuées aux différents composants du stockage pour la sûreté sont effectivement remplies.

Elle permet aussi au travers notamment des scénarios de dysfonctionnement voire de scénarios « *what-if* » d'aider au choix de solutions techniques en analysant le poids de certains composants ouvrages.

Elle inclut la quantification de la performance des composants du système de stockage au travers d'indicateurs de fonctionnement et de l'impact sur l'homme exprimé en termes de dose, pour un éventuel transfert des radionucléides jusqu'à la surface.

5.4 L'analyse qualitative des incertitudes et risques

L'analyse qualitative de sûreté (AQS) recense et évalue les incertitudes de manière systématique, composant par composant, au regard de leurs fonctions de sûreté, et propose des modalités pour leur gestion. Elle évalue ainsi :

- les risques liés aux incertitudes sur le comportement des composants, en tenant compte de leur évolution sur le long terme ;
- les risques liés aux événements d'origine externe.

Pour un composant contribuant à une fonction de sûreté, l'analyse conduit à examiner si les risques et incertitudes peuvent :

- affecter la réalisation de la fonction de sûreté et des performances associées qui sont allouées au composant ;
- avoir une influence sur l'aptitude d'un autre composant à réaliser sa fonction de sûreté et ses performances associées.

Les effets induits d'un composant sur l'autre par le biais d'une perturbation sont également pris en compte. L'analyse examine alors quelles performances de quelles fonctions de sûreté peuvent s'en trouver altérées. Une appréciation argumentée en s'appuyant le cas échéant sur des calculs spécifiques est portée sur le risque de diminution significative des performances attendues des composants et qui contribuent à la réalisation des fonctions. Il s'agit par exemple d'évaluer l'effet que peut avoir l'incertitude (ou le risque) sur la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture si une valeur défavorable du paramètre en question était retenue.

Les causes possibles de dysfonctionnement du ou des composant(s) impliqué(s) sont alors identifiées et un jugement qualitatif sur leur vraisemblance et leurs effets est porté. L'analyse considère les voies potentielles de transfert des radionucléides et toxiques chimiques. Elle conduit ainsi à considérer :

- les composants assurant les fonctions de sûreté après fermeture du stockage (exemple : Callovo-Oxfordien, ouvrages de fermeture...) ;
- les composants qui ne contribuent pas à la réalisation d'une fonction de sûreté mais qui sont nécessaires à l'évaluation (exemple : encaissants supérieurs, biosphère) ;
- les composants qui n'ont pas de fonction de sûreté après fermeture mais avoisinant un composant assurant une fonction de sûreté, et susceptibles de perturber son fonctionnement (par exemple la perturbation alcaline engendrée par le revêtement des galeries sur le Callovo-Oxfordien en champ proche).

Les incertitudes analysées dans le cadre de la sûreté après fermeture répondent à la typologie des incertitudes présentées dans le guide de sûreté du stockage géologique (1) :

- les incertitudes sur les données d'entrée du projet de stockage (celles portant notamment sur l'inventaire radiologique et toxique des colis stockés, celles relatives au milieu géologique incluant la formation hôte, les formations encaissantes et l'hydrogéologie) ;
- les incertitudes portant sur les caractéristiques intrinsèques des composants du stockage ;
- les incertitudes sur les processus régissant l'évolution du stockage, incluant l'état initial à la fermeture ;
- les incertitudes technologiques.

Les risques analysés dans le cadre de la sûreté après fermeture sont pour l'essentiel liés aux événements externes, aux intrusions humaines involontaires et à la criticité. Ils intègrent ainsi :

- les incertitudes liées aux événements futurs d'origine naturelle (climatique, géodynamique...) ;
- les incertitudes liées aux activités humaines (intrusions, effets anthropiques) ;
- la présence de matières fissiles après fermeture du stockage et l'incertitude sur l'inventaire et le comportement des alvéoles dans le temps.

La gestion des incertitudes ou risques passe par les modalités suivantes :

- 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 recours à des matériaux simples dont on maîtrise le comportement (acier non allié, béton, etc.) et recours par exemple à un conteneur de stockage étanche pour se prémunir des incertitudes sur le comportement des radionucléides en température ;
- un choix de valeur conservatif dans le cadre du domaine d'évolution normale si les effets restent dans le domaine d'évolution normale (cf. paragraphe ci-après) ;
- la définition des autres scénarios si les effets sortent du domaine d'évolution normale.

5.5 Les scénarios

5.5.1 Le scénario d'évolution normale

Le scénario d'évolution normale comprend l'ensemble des possibilités d'évolutions attendues du stockage dans le temps et dans l'espace, depuis sa fermeture en supposant que toutes les fonctions de sûreté définies sont satisfaites. Ces possibilités d'évolutions regroupent toutes les évolutions qui paraissent suffisamment probables pour être considérées comme « normales » au sens du guide de sûreté du stockage géologique (1). C'est la raison pour laquelle la notion de « domaine d'évolution normale » est introduite.

Pour traduire ce domaine, le scénario d'évolution normale est défini par :

- une représentation de référence qui représente le stockage tel que conçu et repose sur un ensemble d'hypothèses et données dont la logique de sélection est de retenir celles qui s'appuient sur la meilleure connaissance scientifique et technique disponible. Dans ce cadre, les choix portent ainsi de manière générale sur les caractéristiques et les processus qui sont les plus étayés scientifiquement : ils conduisent à retenir des modèles et données qualifiées de « au meilleur de la connaissance » ;
- une représentation du stockage correspondant aux exigences applicables à Cigéo. Elle conduit à retenir les valeurs des exigences de sûreté après fermeture ou performances retenues par le concepteur à ce stade du projet. En absence d'exigences spécifiées de certaines caractéristiques des composants contribuant aux fonctions de sûreté, des hypothèses et données correspondant aux bornes les plus « conservatives » des connaissances acquises sont retenues (par exemple le choix de valeurs conservatives des paramètres). Cette représentation est dénommée « enveloppe » mais la notion d'enveloppe dans ce cadre n'a pas vocation à assurer le caractère majorant de l'impact, mais elle correspond au fonctionnement tel que spécifié dans les exigences applicables à Cigéo.

La démarche globale permet de prendre en compte des incertitudes dont les effets restent dans le domaine d'évolution normale. La situation dénommée « enveloppe » est moins représentative d'une évolution probable du stockage. Elle peut en effet considérer le cumul d'un ensemble d'hypothèses conservatives bien que leur occurrence simultanée soit peu probable. Elle offre ainsi une vision moins favorable vis-à-vis de la sûreté après fermeture.

Par ailleurs, si un composant ne contribue pas aux fonctions de sûreté après fermeture (par exemple le revêtement en béton des galeries), des choix conventionnels conduisant à ne pas prendre en compte ses caractéristiques qui pourraient être néanmoins favorables au retard et à l'atténuation des radionucléides peuvent être faits. Des modèles et valeurs « pénalisantes » sont alors affectés aux processus et phénomènes impliqués (par exemple la non prise en compte de capacité de rétention des revêtements de galeries).

5.5.2 Les scénarios d'évolution altérée et « What-if »

Dans le cadre de l'analyse de sûreté, les causes de dysfonctionnement d'un composant pouvant entraîner une dégradation significative de sa performance ou à une perte d'une fonction faisant sortir le système de stockage du domaine d'évolution normale sont identifiées et analysées :

- si les causes de dysfonctionnement identifiées sont peu vraisemblables, des scénarios d'évolution altérée sont alors définis. Ils visent à évaluer les conséquences de la dérive dans le temps du système de stockage et de vérifier les lignes de défense ;
- si les causes de dysfonctionnement sont très peu vraisemblables des scénarios de type « What-if » sont définis pour tester la robustesse du système de stockage au même titre que les évaluations complémentaires de sûreté mises en œuvre en sûreté exploitation.

L'analyse examine également certaines combinaisons ou cumuls d'incertitudes en se focalisant sur les effets de cumuls potentiels aggravants dans le cadre de scénarios « What-if ». Il est à noter que certains scénarios sont pris de manière conventionnelle pour répondre aux demandes de l'ASN afin de tester la robustesse du système de stockage.

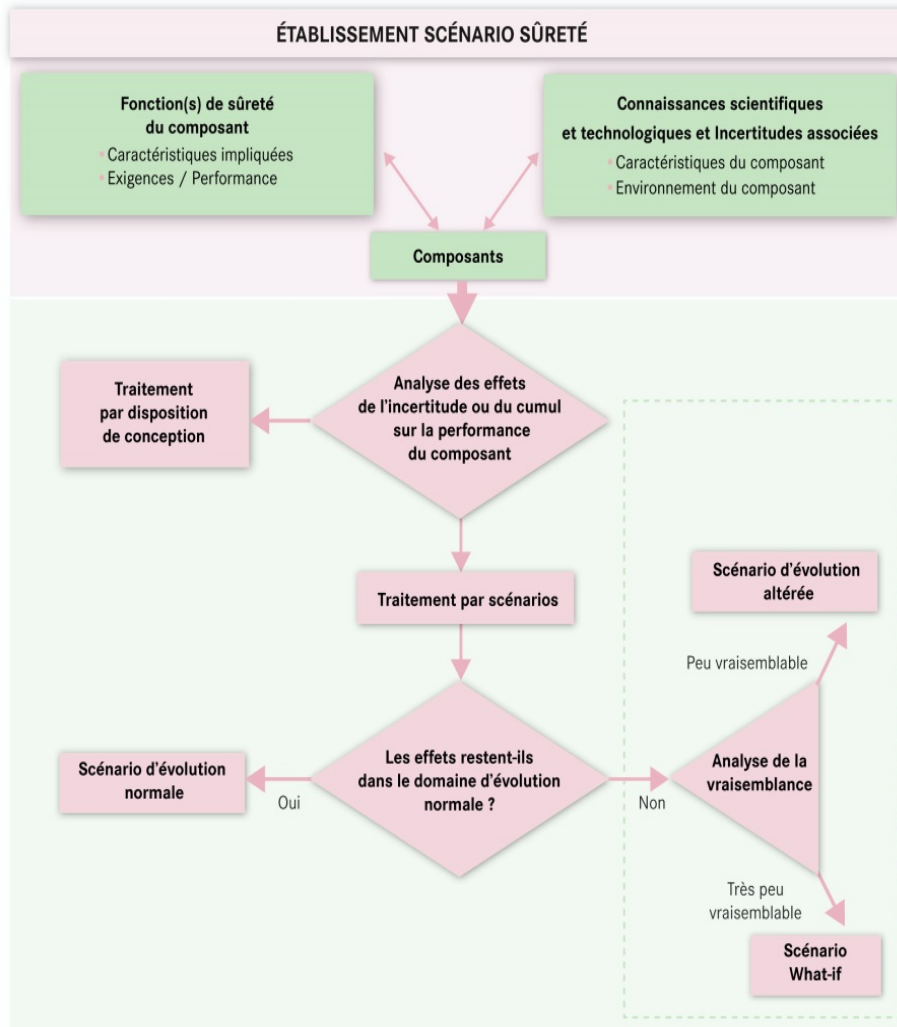


Figure 5.5-1: Illustration schématique des différentes étapes de l'analyse qualitative de sûreté et du lien avec la définition des scénarios de sûreté

L'analyse conduit également à l'exclusion de scénarios jugés invraisemblables résultant d'un cumul de deux causes de dysfonctionnement totalement indépendantes l'une de l'autre.

5.5.3 Les scénarios d'intrusion humaine involontaire

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire retenus pour Cigéo répondent aux demandes du guide de sûreté du stockage géologique (1) (cf. Volume III). Il s'agit de situations d'intrusion par forage(s).

En cohérence avec les pratiques internationales, la description des scénarios enveloppes retenus précise l'objectif et les circonstances de l'opération de forage, la localisation du forage par rapport au système de stockage, les types d'impacts potentiellement générés, le nombre de forages à considérer, les aspects temporels, les cas d'évaluation à envisager et les paramètres associés (cf. volume III).

Pour l'identification des scénarios pertinents et la sélection des scénarios à quantifier, une approche par étapes est retenue partant de l'analyse des diverses situations de forage pouvant intervenir sur le site de Cigéo, pour arriver à un nombre restreint de scénarios « enveloppes » à quantifier.

- Etape 1 - Revue des situations envisageables

Dans un objectif d'exhaustivité, la première étape est un passage en revue des différentes situations susceptibles d'impliquer la réalisation de forages dans le contexte de Cigéo. Cette examen est organisé selon trois points de vue : l'objectif et la formation géologique cible de l'opération de forage, la localisation du forage par rapport aux ouvrages du stockage et aux panaches éventuels de radionucléides et de toxiques chimiques dans les formations encaissantes, et la phase de temps considérée pour le forage lui-même et pour le système de stockage.

L'analyse de la combinaison de ces paramètres conduit à une première liste de « situations de forage » susceptibles de modifier le fonctionnement du stockage.

- Etape 2 - Analyse des situations et sélection de scénarios à quantifier

Les situations retenues sont examinées au regard des différents types d'impacts potentiels et de leur hiérarchisation. L'objectif est d'identifier des scénarios, susceptibles d'être « enveloppes » en termes d'impacts et dont le traitement permet de rendre compte de manière « majorante » d'un ensemble de situations.

En parallèle, une analyse des situations de forage est faite au plan de leur vraisemblance. L'évaluation du niveau de vraisemblance est basée sur un ensemble de facteurs susceptibles d'intervenir dans la décision de réalisation des forages : attractivité de la ressource espérée ou vérifiée, potentialités d'utilisation de la ressource et profondeur de la profondeur cible.

5.6 L'évaluation quantitative des scénarios

5.6.1 Le schéma général de mise en œuvre des calculs

L'évaluation quantitative des scénarios repose principalement sur la simulation numérique. En regard de l'objectif de quantification des indicateurs de fonctionnement, les processus mis en jeu dans ce fonctionnement, plus particulièrement le relâchement et la migration des radionucléides et des toxiques chimiques, doivent être représentés de manière aussi fine et détaillée que nécessaire et possible, notamment aux différentes échelles de temps et échelles d'espace (de l'échelle décimétrique pour le colis à l'échelle pluri-déca-kilométrique pour le milieu géologique). Cette représentation peut être contrainte par les limitations du moment des outils de simulation et elle doit être cohérente avec les domaines de validité et de précision numérique de ces outils. La maîtrise de la simulation numérique en tant qu'outil pour la quantification des impacts des scénarios nécessite donc une approche de simulation structurée et en qualité, tant sur le plan de la conceptualisation phénoménologique que sur celui de la conceptualisation numérique.

A ce stade, pour représenter le système global combinant toutes les échelles d'espace, l'Andra retient une décomposition du modèle numérique de représentation retenu, qui comprend le milieu géologique multicouches (Callovo-Oxfordien, encaissants sus et sous-jacents, milieu géologique multicouches), le stockage et ses composants ouvragés (colis, alvéoles, galeries, ouvrages de liaison surface/fond...), en plusieurs compartiments d'échelles géométriques emboîtées, et agencés en séquence de simulations. Ces compartiments vont de celui du colis à celui du milieu géologique comprenant le stockage, comme illustré sur la Figure 5.6-2. Le sens de l'enchaînement entre les compartiments dépend du processus (hydraulique ou transport des radionucléides et toxiques chimiques) et il se fait de l'hydraulique vers le transport.

Ainsi, un calcul est effectué pour chaque compartiment et les liens entre les compartiments sont considérés par le biais de conditions aux limites et de fonctions de relâchement (i.e. de flux ou de concentration de radionucléides et toxiques chimiques) issues du modèle précédent, en vérifiant leur pertinence du point de vue numérique et du point de vue de la physique.

Le sens de l'enchaînement des modèles est inversé entre l'hydraulique et le transfert des radionucléides et toxiques chimiques (Figure 5.6-1) :

- pour l'hydraulique, le premier calcul est réalisé sur le plus grand compartiment, correspondant au modèle géologique « régional » multicouches ; les calculs sont ensuite réalisés sur des domaines de plus en plus petits. L'enchaînement des compartiments est assuré des conditions limites hydrauliques (charge, débit d'eau) issues du modèle précédent ;
- pour le transfert de radionucléides et toxiques chimiques, le premier calcul est réalisé à l'échelle du colis (zone de relâchement des solutés) pour aboutir à un calcul réalisé sur le plus grand compartiment, correspondant au modèle géologique « régional » multicouches. L'enchaînement des compartiments est assuré par des historiques de débits molaires de solutés.

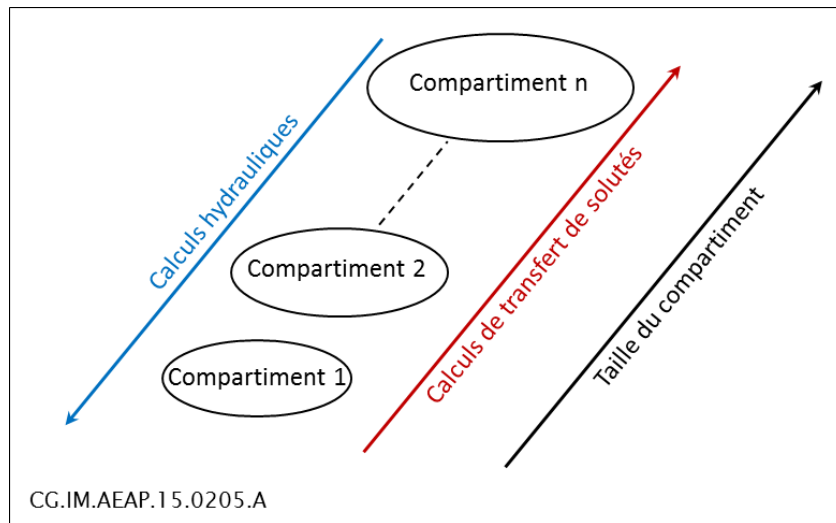


Figure 5.6-1 : Enchaînement des modèles en hydraulique et en transfert de solutés

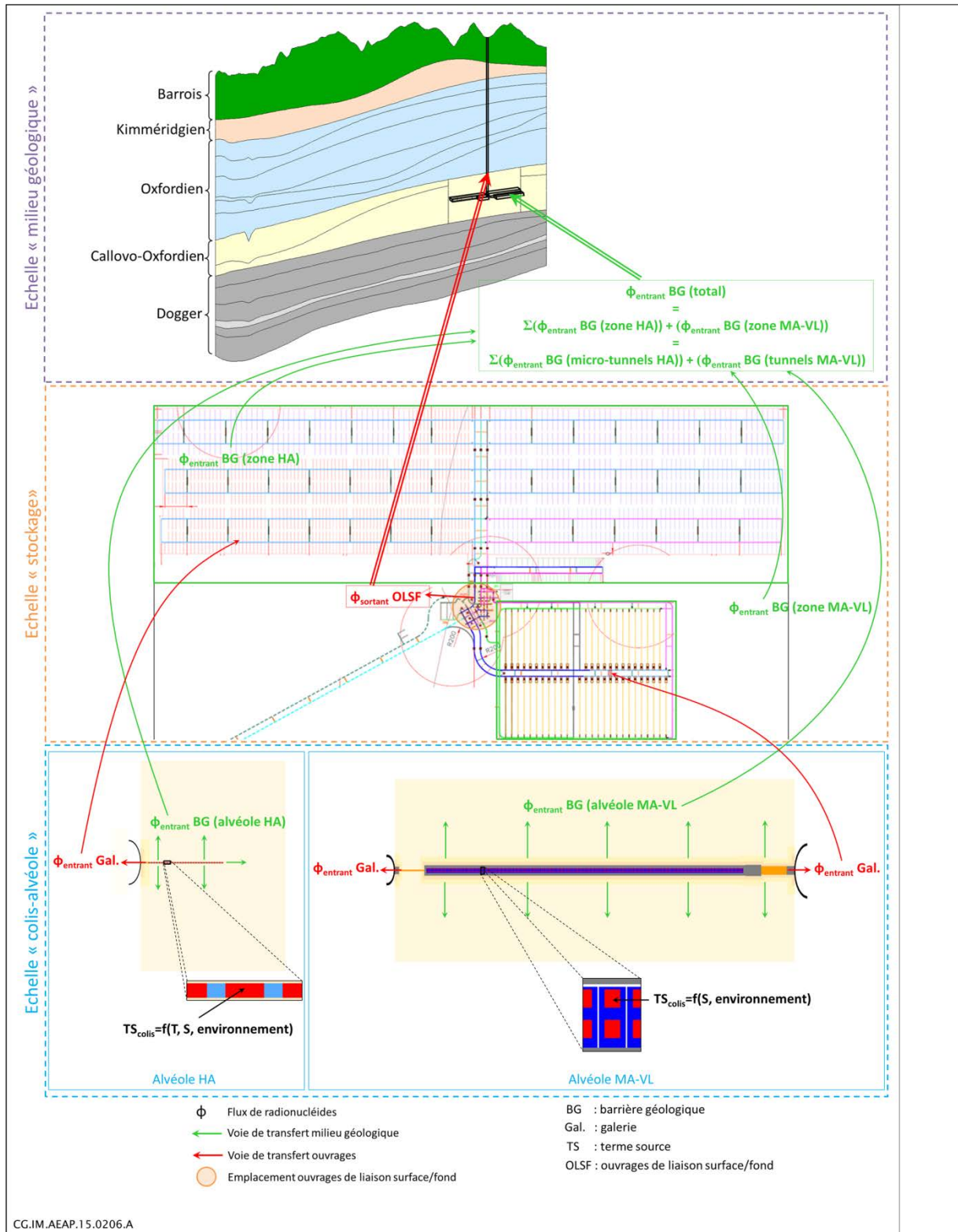


Figure 5.6-2 : Principe de l'architecture de calcul par compartiments emboîtés

Comme le présente la Figure 5.6-2, à ce stade, l'architecture de calcul se décompose en trois compartiments emboîtés d'échelle croissante, et agencés en séquence qui sont détaillés en Annexe 4 :

5.6.2 Les indicateurs de fonctionnement du système de stockage

L'évaluation quantitative après fermeture de Cigéo s'appuie sur les valeurs d'un ensemble d'indicateurs afin :

- de vérifier le fonctionnement individuel de chaque composant vis-à-vis des transferts et d'évaluer leur performance au regard des fonctions de sûreté après fermeture (cf. présentation au chapitre 1 du Volume III) qui leur sont allouées ainsi que le fonctionnement global ;
- de juger de la robustesse du stockage ;
- 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 retenus pour l'évaluation de sûreté après fermeture de Cigéo sont :

- les répartitions en pourcentage entre les flux d'eau et des flux convectifs et diffusifs de radionucléides (et toxiques chimiques) dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien. Ces indicateurs sont utilisés pour évaluer les fonctions « s'opposer à la circulation d'eau » et « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage » ;
- les répartitions entre la quantité (masses, activités, pourcentages...) de radionucléides (et toxiques chimiques) émise ou relâchée par les colis et celles transitant le long et/ou dans les galeries et les liaisons surface-fond et migrant dans le Callovo-Oxfordien, pour apprécier les voies de transfert sur la durée de l'analyse, et ce en regard de la quantité initiale de radionucléides et toxiques chimiques contenue dans les colis. Ces indicateurs sont appropriés pour évaluer les fonctions « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». Bien que les radionucléides de période inférieure à 1000 ans décroissent totalement dans le stockage en évolution normale, ils sont retenus le cas échéant en situation altérée. Selon la période radioactive des radionucléides, la quantité disparue par décroissance radioactive est aussi retenue pour l'évaluation quantitative ;
- les débits molaires et d'activité de radionucléides (et toxiques chimiques) au cours du temps à la sortie de chacun des composants (colis, alvéole, 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 5.6-3). Ces indicateurs permettent d'apprécier les performances de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». De manière plus précise, on considère : (i) l'atténuation du flux de radionucléides (et toxiques) 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 et (iii) l'atténuation des maxima de débit molaire en sortie des composants ;
- la cartographie des concentrations en solution dans le Callovo-Oxfordien et dans les formations encaissantes, notamment dans les (horizons) aquifères. Cet indicateur permet d'apprécier, à différentes dates, le cheminement des radionucléides (et toxiques chimiques). La comparaison des quantités de radionucléides et toxiques chimiques qui migrent hors de l'alvéole, ramenées aux quantités relâchées, illustre la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ».

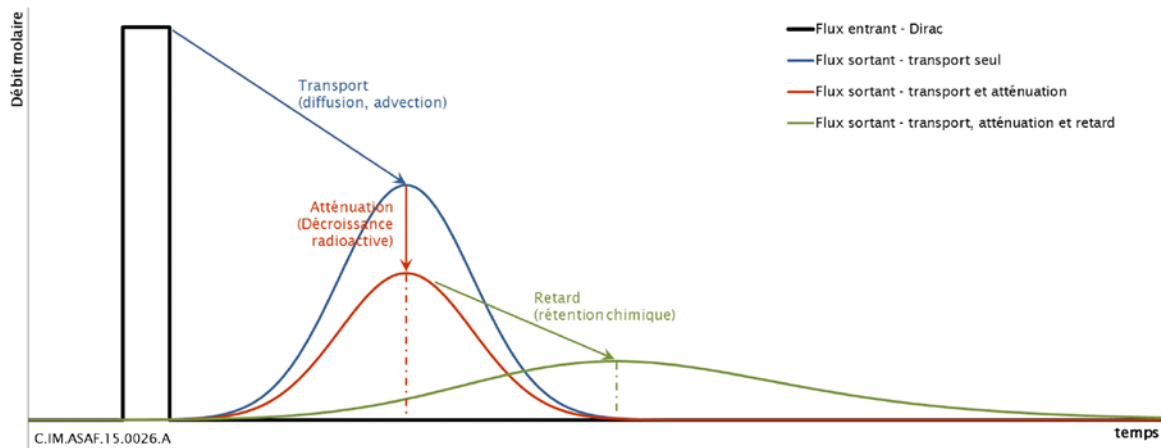


Figure 5.6-3 : Schéma illustrant l'utilisation d'indicateurs autres que la dose en s'appuyant sur la période radioactive du radionucléide et son comportement en solution

5.6.3 L'indicateur permettant d'évaluer l'impact sur l'homme

Afin de vérifier que l'objectif de protection radiologique fixé au chapitre 4 est respecté, il est nécessaire d'évaluer l'impact d'un éventuel transfert des radionucléides et toxiques chimiques jusqu'à un exutoire potentiel en surface. Pour ce faire, conformément au guide ASN-2008, on retient des groupes de référence hypothétiques, représentatifs des individus susceptibles d'être soumis aux expositions les plus élevées. Ces individus seront supposés vivre au moins partiellement en autarcie associée à une biosphère¹⁵ constituée par la partie de l'environnement facilement accessible à leurs activités.

La biosphère n'a donc 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 permettre le calcul de leurs impacts en termes de dose.

Compte tenu des échelles de temps à considérer, les grands événements climatiques régionaux prévisibles sont pris en compte et la démarche retenue consiste à identifier des biosphères-types, représentatives des différents états que pourrait prendre à plus grande échelle la biosphère, compte tenu de ces événements.

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 est appliquée pour les évaluations quantitatives de sûreté se décline selon les étapes suivantes (cf. Figure 5.6-4). Elle est détaillée en Annexe 6 :

¹⁵ La biosphère est susceptible de permettre le transfert vers les personnes des radionucléides provenant de l'installation de stockage entraînant une exposition interne (inhalation, ingestion) ou une exposition externe.

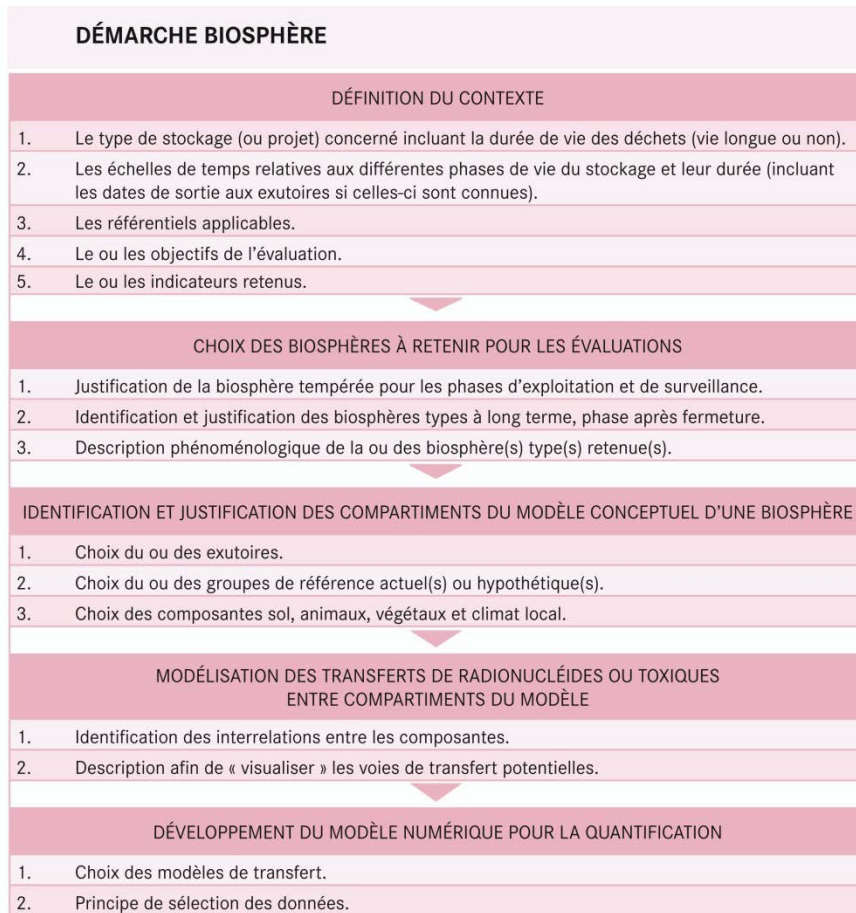


Figure 5.6-4 : Schéma illustrant les différentes étapes de choix et de description d'une biosphère

6

Management de la sûreté

6.1	<i>Le management de la sûreté dans le système de management intégré</i>	72
6.2	<i>La maîtrise des exigences</i>	72
6.3	<i>Le respect des exigences applicables</i>	73
6.4	<i>La maîtrise de la conception et de la réalisation</i>	73
6.5	<i>La maîtrise des outils</i>	74
6.6	<i>La maîtrise des données d'entrée</i>	76
6.7	<i>Le processus de revues internes et externes</i>	78

6.1 Le management de la sûreté dans le système de management intégré

L'Andra a mis en place un système de management répondant aux exigences des normes ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001. Ce système de management intégré répond à l'exigence de protection des intérêts visés par l'article L.593-1 du code de l'environnement. Le système de management de l'Andra doit démontrer « son aptitude à fournir régulièrement un produit ou service conforme aux exigences des clients et aux exigences légales et réglementaires applicables, et vise à accroître la satisfaction de ses clients ».

Le système de management de l'Andra s'applique au projet Cigéo. De plus, un plan de management du projet Cigéo a été établi pour la phase d'étude d'avant-projet. Il définit les règles applicables pour l'organisation, la conduite et la gestion du projet en phases études, notamment pour ce qui concerne la gestion de la maîtrise d'œuvre système et sous-systèmes. Les principales dispositions retenues pour s'assurer que les exigences relatives à la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement sont systématiquement prises en compte dans toute décision concernant Cigéo sont décrites dans les paragraphes suivants.

6.2 La maîtrise des exigences

L'Andra a consolidé dans un document ad hoc les exigences applicables au projet Cigéo. Celles-ci sont organisées par fonctionnalités attendues de Cigéo. Dans un objectif de complétude, l'identification de ces fonctionnalités résulte de l'analyse fonctionnelle qui s'est construite progressivement au cours des études et recherches menées depuis 1991.

Pour répondre aux objectifs de sûreté après fermeture, les recherches ont ainsi conduit l'Andra à identifier plusieurs fonctions de sûreté spécifiques (voir supra). Sur la base des résultats des études et recherches menées jusqu'ici, les fonctions de sûreté après fermeture sont déclinées en un ensemble de dispositions techniques concrètes qui sont prises en compte par la maîtrise d'œuvre pour assurer l'atteinte des objectifs de sûreté.

La première version des exigences applicables au projet Cigéo a été soumise à une revue de projet tenue au premier semestre 2011 sous l'égide de la DGEC, dont les conclusions ont été prises en compte dans les versions suivantes. Elles sont tenues à jour avec l'avancée des connaissances scientifiques et technologiques parallèlement au développement industriel du projet ainsi que l'évolution du contexte externe. Elle comporte ainsi une instruction des conséquences techniques, économiques et temporelles sur le projet, et peut conduire à une évolution du référentiel du projet (spécifications techniques de besoin...). Cette révision passe par un comité d'exigences qui se tient périodiquement pour analyser les éventuelles évolutions en termes de solutions techniques imposées au regard de l'avancée de la connaissance.

L'évaluation de sûreté après fermeture présentée dans le dossier support à la demande d'autorisation de création se fondera non seulement sur les résultats de la conception d'ingénierie de Cigéo mais aussi sur la justification du respect, par cette conception, de l'ensemble des exigences applicables à Cigéo en matière de sûreté après fermeture. Cette évaluation de la sûreté après fermeture du stockage implique un savoir-faire spécifique et la mobilisation de nombreuses disciplines (génie civil des travaux souterrains et ingénierie nucléaire, sûreté, sciences de la terre, science des matériaux, simulation numérique, instrumentation et gestion des données...) afin de caractériser les phénomènes susceptibles d'être rencontrés. Compte tenu de la particularité de cette évaluation qui s'appuie sur sa maîtrise de nombreux phénomènes (thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques) dans le temps et dans l'espace, et des incertitudes associées, de ses années d'expérience en la matière, et de l'enjeu de la sûreté après fermeture, l'Andra reste le maître d'œuvre de cette évaluation de sûreté après fermeture.

L'évaluation de sûreté après fermeture doit ainsi s'articuler avec la démarche de conception : l'Andra impose la prise en compte d'exigences spécifiées pour choisir les options de conception ; elle doit ensuite vérifier que les options de conception proposées répondent non seulement aux exigences spécifiées mais aussi aux exigences fonctionnelles dont celles-ci découlent. Ainsi, pour chaque nouvelle option de conception proposée, notamment en termes d'architecture de stockage, l'Andra

vérifie son impact sur les performances à long terme du stockage en évolutions normale ou altérée. L'Andra réalise à cette fin des évaluations caractérisant le niveau de sûreté du stockage, comme elle l'a fait notamment lors de l'établissement des dossiers 2009 et 2012.

6.3 Le respect des exigences applicables

Les exigences applicables ont été traduites en spécifications techniques de besoin pour la conception de Cigéo.

La vérification de la prise en compte des exigences relatives à la protection des intérêts visés par l'article L. 593-1 du code de l'environnement constitue une partie du contrôle de la conception. Ce contrôle est réalisé de façon continue dans le cadre de la gestion des performances du projet. Le contrôle de la conception est également réalisé à l'occasion de réunions d'avancement du projet. Il est renforcé par les revues de projet prévues à chaque fin de phase.

Les activités importantes pour la protection (AIP) sont réalisées conformément aux dispositions de l'arrêté du 7 février 2012. Les paragraphes suivants précisent les dispositions prises pour la réalisation des AIP spécifiques à la sûreté après fermeture.

6.4 La maîtrise de la conception et de la réalisation

6.4.1 La maîtrise des prestataires et interactions avec les partenaires scientifiques

Lorsque les études nécessitent de la sous-traitance, la maîtrise des prestataires est encadrée par les procédures de l'Andra pour ce qui relève notamment de la qualité des prestations fournies.

Le suivi des prestations répond aux exigences de la norme ISO-9001 en termes de suivi des contrats. Un programme d'audit des fournisseurs est défini annuellement et mis en œuvre.

L'Andra assure aussi la coordination de nombreux partenariats sur des thématiques techniques et scientifiques variées. Ces partenariats sont définis en accord avec la politique scientifique de l'Agence selon les trois principes suivants :

- pertinence scientifique ;
- partage de thèmes d'intérêts communs ;
- établissement d'axes de recherche pluriannuels.

Ces partenariats font l'objet de comités techniques et/ou comités directeurs afin notamment de s'assurer de la progression des recherches et de la capitalisation des connaissances acquises et de leur valorisation, et définir les évolutions des programmes de recherche.

6.4.2 La maîtrise des études liées au caractère innovant de Cigéo - l'échelle TRL

En complément aux études d'ingénierie confiées aux maîtrises d'œuvre, l'Andra poursuit ses études en propre, essais et recherches pour préciser des options de conception, évaluer les propositions techniques des maîtrises d'œuvre, mettre au point des techniques de réalisation des ouvrages, acquérir des éléments complémentaires de justification et de démonstration, et préparer la demande d'autorisation de Cigéo.

Le caractère spécifique et nouveau du stockage géologique profond a conduit l'Andra à utiliser l'échelle internationale TRL¹⁶ comme outil indicatif d'appréciation de la progression technique du projet Cigéo et de ses diverses composantes. Le phasage du projet et ses jalons décisionnels et d'autorisation ne sont toutefois pas directement conditionnés aux niveaux TRL.

¹⁶ L'échelle internationale TRL (Technology Readiness Level) permet de quantifier le niveau de maturité technologique atteint par un élément (matériel, composant, système...). Elle fait l'objet de la norme ISO 16290:2013 [7]. Développée principalement pour les systèmes spatiaux, elle peut être transposée à un domaine plus large, notamment pour évaluer l'état de maturité technique d'un projet ou pour mesurer la progression d'une technologie tout au long de son développement.

6.5 La maîtrise des outils

Les outils de simulation mis en œuvre pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture font l'objet d'un processus rigoureux de sélection, de développement, de qualification et de validation. Ces outils sont notamment organisés et structurés dans le cadre de la plate-forme Cassandra (Codes appliqués à la simulation des stockages de l'Andra), qui a été développée pour les accueillir dans un cadre unifié (cf. 6.5.2).

Ces outils s'accompagnent des règles de bonne pratique d'utilisation et de vérifications aux différentes étapes de leur mise en œuvre, en s'appuyant sur deux volets étroitement liés :

- pour l'aspect physique, celui de s'assurer que les processus, les modèles et les différentes données sont correctement représentés dans les fonctionnalités physiques et mathématiques des outils de calcul ;
- pour l'aspect numérique, celui de s'assurer que les paramètres numériques définis par l'utilisateur permettent une résolution efficace, précise, convergée et juste des équations mathématiques du problème posé.

Pour ce faire, l'Andra a poursuivi depuis le dossier 2005 trois types d'actions interdépendantes, afin de se doter d'un « bouquet » d'outils de simulation performants et maîtrisés capables de répondre aux différents besoins physiques et numériques, tout en garantissant un haut niveau de qualité requis à chaque étape de la mise en œuvre d'une simulation, notamment pour les évaluations de performance et de sûreté présentées dans ce dossier. Ces trois axes sont déclinés ci-après.

6.5.1 Un bouquet d'outils capable de mener des simulations numériques multi-physiques sur de grandes échelles de temps et d'espace

Afin de disposer d'outils validés et éprouvés, la stratégie de l'Andra a consisté principalement à exploiter des logiciels commerciaux qualifiés et validés et à compléter leurs fonctionnalités pour leur permettre de représenter de manière opérationnelle et fine les processus physiques (et leurs éventuels couplages) sur de grandes échelles de temps et d'espace et en minimiser les erreurs liées à leur utilisation (erreurs humaines, erreurs numériques...).

Les développements (ajout de nouvelles fonctionnalités physiques et numériques) ont été accompagnés par la mise en place d'une tierce maintenance applicative (TMA) afin d'assurer (i) une gestion de configuration des outils, leur qualification systématique à chaque développement et l'intégration du retour d'expérience de l'utilisation des outils, incluant la documentation, (ii) la maintenance corrective des outils, qui comprend également la vérification systématique de la non régression des outils, et (iii) la mise en œuvre applicative qui assure que les outils de calcul sont opérationnels et efficaces dans l'environnement de travail de l'Andra et de ses prestataires.

6.5.2 Une plate-forme de simulation simplifiée à l'intérieur d'un « bouquet » d'outils

Suite au Dossier 2005 argile, l'Andra a souhaité maintenir une logique de plate-forme pour la réalisation des évaluations de performance et de sûreté du présent dossier. Cependant, afin de maîtriser de manière plus efficace la totalité des développements, de les focaliser efficacement sur ses besoins et de disposer d'une portabilité et d'une ergonomie optimale, l'Andra a mis en place en propre la plate-forme simplifiée Cassandra, dont les fonctionnalités sont décrites ci-après.

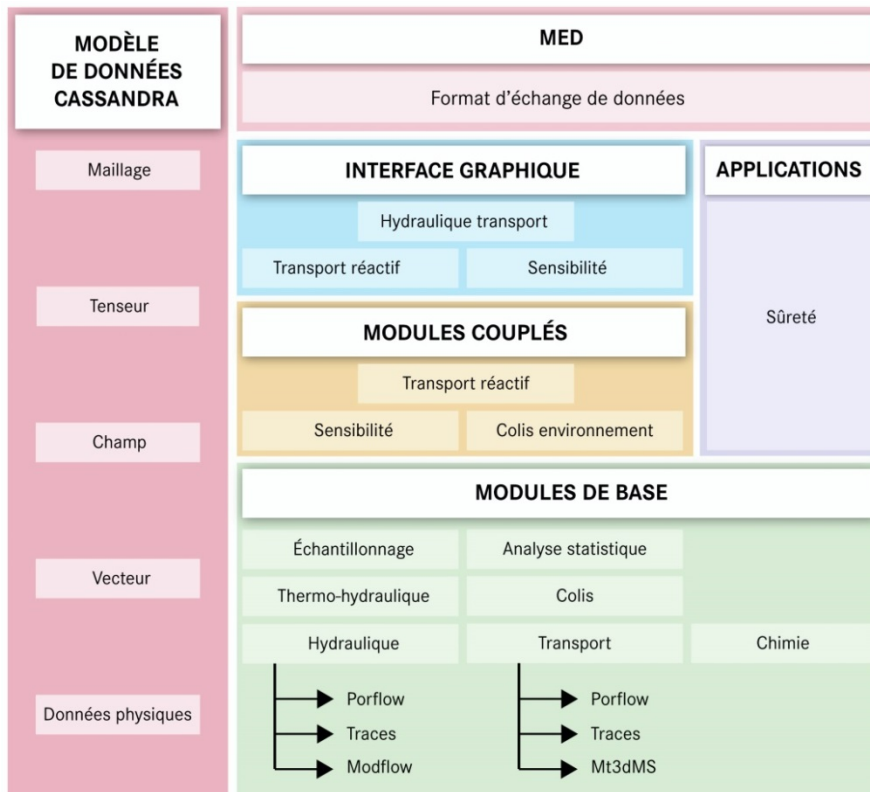


Figure 6.5-1 : Architecture de la plate-forme Cassandra

La phase de qualification et de validation a été réalisée essentiellement par des ingénieurs physiciens, capables d'analyser finement les résultats et d'évaluer l'ergonomie d'utilisation de la plate-forme. Pour les cas les plus complexes, l'équipe s'appuie sur des experts externes permettant de valider les choix de modélisation et les choix numériques de mise en œuvre des cas tests.

6.5.3 Une chaîne de simulation intégrée

Pour mener les simulations numériques, l'Andra a mis en œuvre un ensemble d'outils et d'opérations associées, de natures très différentes, suivant une chaîne de simulation : (i) des outils de pre-processing (maillages, outils de gestion des données physiques, géométriques, DAO,...), (ii) des outils de processing ou de résolution (les outils de calculs de la plate-forme Cassandra et hors Cassandra) et (iii) des outils de post-processing (exécutables d'extractions ou de conversion des informations, outils de post-traitement graphique...). Afin de réaliser et d'exploiter de manière simple, lisible, tracée et répétitive la chaîne de calcul des évaluations de sûreté, l'Andra a exploité un logiciel intégrateur dont les fonctionnalités sont décrites dans la figure suivante.

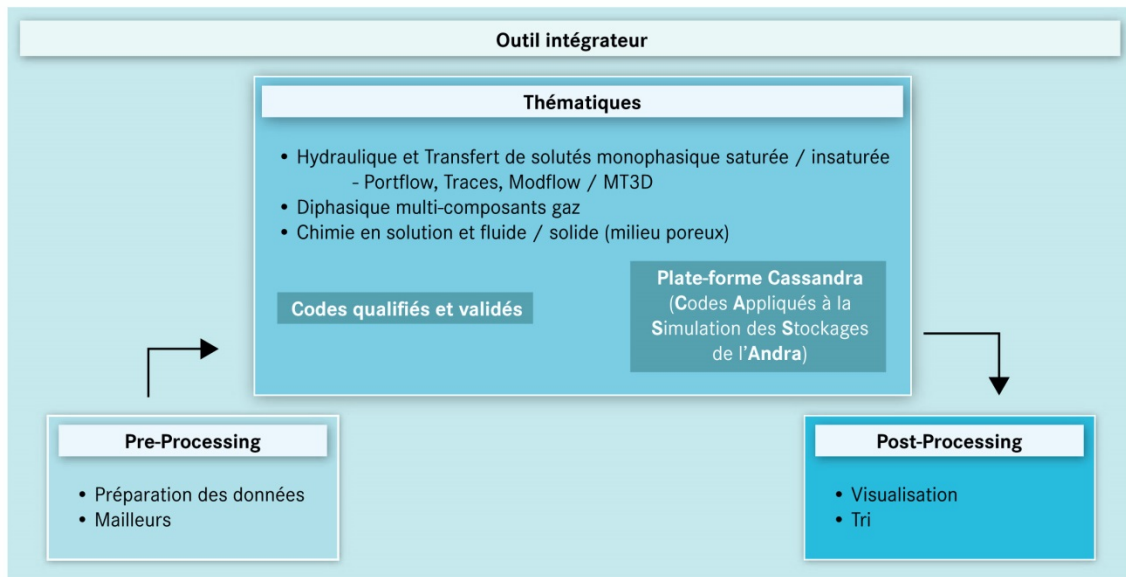


Figure 6.5-2 : Chaîne de calcul intégrant les différents outils de simulation utilisés pour les évaluations de sûreté après fermeture

6.6 La maîtrise des données d'entrée

Les données scientifiques et techniques qui servent de support à l'établissement du présent dossier ont un rôle central dans le choix des modèles et les valeurs des paramètres associés à ces modèles pour les évaluations phénoménologiques, les dimensionnements et les évaluations de sûreté après fermeture.

Parmi ces données, les connaissances intrinsèques sur les colis de déchets sont fournies par les producteurs et suivent un processus d'analyse et d'instruction par l'Andra.

Les données relatives au site (milieu géologique et environnement de surface) et aux matériaux et composants ouvragés (technologies de mise en forme et de mise en œuvre, caractéristiques physico-chimiques...) sont de la responsabilité de l'Andra. Elles sont acquises en propre par l'Agence ou par le biais de partenariats scientifiques ou de contrats de sous-traitance. Ces données se caractérisent par leur nombre et leur diversité (paramètres géo-mécaniques, logs géologiques, diagraphies, mesures sismiques... ; technologies de réalisation des composants ouvragés et des opérations d'exploitation du stockage). Chacune est acquise selon des méthodes variées, directement ou indirectement, et à différentes échelles spatiales (en forage, sur échantillons, dans le Laboratoire souterrain etc.).

Plus particulièrement, les données sur le comportement des colis de déchets en situation de stockage sont sous la responsabilité de l'Andra avec le support des producteurs afin notamment de s'assurer de la cohérence et de la pertinence des travaux et de leurs résultats en regard des connaissances intrinsèques sur les colis de déchets.

6.6.1 La chaîne de traitement des données : de la donnée brute à la donnée intégrée

Ces données scientifiques font l'objet d'un processus rigoureux de gestion et de traçabilité et ont nécessité un cadre formel de diffusion lors des processus décisionnels internes à l'Andra.

Des dispositifs ont ainsi été mis en place pour conforter la qualité des données et s'assurer qu'elles ne soient pas utilisées dans des contextes pour lesquels elles ne sont pas valides. C'est le cas du processus de traitement et de traçabilité des données depuis leur acquisition jusqu'à leur utilisation pour les simulations phénoménologiques et les simulations pour les évaluations quantitatives de sûreté après fermeture qui se doit de justifier et de crédibiliser l'ensemble des valeurs retenues et utilisées par l'Andra. Cette gestion est indispensable et a pour objectifs :

- d'assurer un traitement rigoureux et justifié, adapté à chaque type de données ;
- de tracer les différentes étapes du traitement des mesures depuis leur acquisition jusqu'à leur utilisation ;
- de permettre l'accessibilité aisée et rapide et la qualité de toutes les données à utiliser et des connaissances.

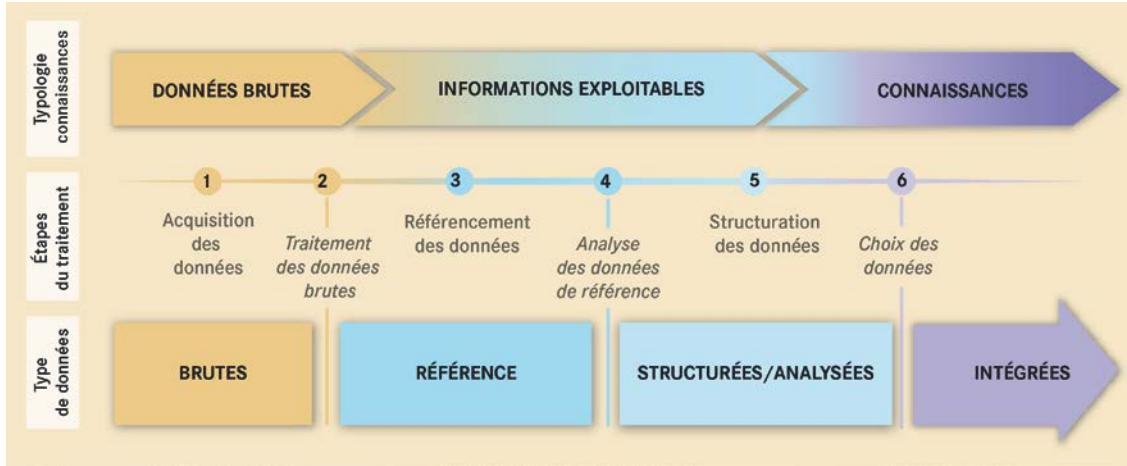


Figure 6.6-1 : Schéma de la chaîne de traitement des données scientifiques depuis l'acquisition jusqu'à l'utilisation

Dans ce processus, les données scientifiques s'organisent en quatre grandes catégories en fonction du traitement qu'elles ont subi (tri, analyse statistique...) :

- les données brutes : il s'agit des données scientifiques acquises provenant des travaux de forages, d'expérimentations, et sur échantillons sans aucun traitement ;
- les données de référence : il s'agit des données brutes qui ont fait l'objet d'un traitement visant à garantir leur pertinence et de leur validité. Lors de ce traitement (appelé référencement), les données brutes sont contrôlées (les données aberrantes sont écartées et dans certains cas, des calculs sont nécessaires pour aboutir à des données de référence). Ces dernières sont alors déclarées et peuvent donc être utilisées pour les analyses ;
- les données structurées/interprétées : il s'agit des données de référence qui, après analyse statistique et traitements éventuels, sont replacées à l'échelle de l'objet qu'elles caractérisent (par exemple à l'échelle d'une formation géologique ou d'une unité géologique ou d'un composant ouvrage du stockage). Elles sont interprétées en termes de représentativité, de variabilité dans l'espace et le temps et d'incertitudes ;
- les données intégrées : ces données sont issues des données structurées à travers des choix conceptuels, principalement une évaluation espace-temps de processus à l'échelle des composants ouvrés et/ou du milieu géologique, ou une évaluation de performance.

La gestion de ces données s'appuie sur un ensemble de bases de données et de documents (référentiels de connaissances, notes conceptuelles..) permettant mener des analyses critiques en fonction notamment de leur nature et de leur utilisation.

6.6.2 Les processus de choix de données et de connaissances scientifiques pour les évaluations de sûreté

La maîtrise des données utilisées pour les modèles et les calculs repose sur un processus formalisé mis en place dans le cadre de l'analyse phénoménologique des situations de stockage, qui astreint à prendre en compte chaque échelle de temps et d'espace dans l'évolution du stockage, et chaque type d'interaction (thermique, hydraulique, mécanique, chimique et radiologique).

Parallèlement, la constitution de référentiels de connaissances sur des sujets précis (les matériaux, les modèles de relâchement, la géologie du site, le modèle d'inventaire) permet une consolidation d'ensemble.

L'Andra a identifié une typologie des modèles et paramètres et une classification de leur positionnement par rapport aux incertitudes selon qu'il s'agisse de modèles et valeurs « phénoménologiques », « conservatives » « pénalisantes », définies en fonction de leur caractère majorant vis-à-vis des évaluations quantitatives de sûreté :

- la valeur phénoménologique est celle qui est jugée la plus probable ou la plus représentative et permet d'obtenir, tout autre paramètre fixé par ailleurs, la meilleure adéquation entre les résultats du modèle et des résultats de mesure ;
- la valeur « conservative », une valeur qui, parmi celles issues des études et des mesures, correspond à la borne haute (ou basse) de la plage des valeurs disponibles et qui permet d'obtenir un impact calculé qui se situe dans une gamme de valeurs hautes (tout autre paramètre étant fixé par ailleurs) ;
- la valeur « pénalisante » ne se réfère pas à un état des connaissances phénoménologiques, mais est choisie de manière conventionnelle comme conduisant de manière certaine à un impact supérieur à ceux qui seraient calculés avec des valeurs possibles.

Cette typologie permet d'utiliser les données en pleine connaissance de leur degré de confiance vis-à-vis de l'évaluation des impacts dans le cadre de l'évaluation quantitative de sûreté.

Par ailleurs, l'Andra a mis en place un système de revues internes dédiées à l'analyse des modèles et données utilisées pour les calculs de sûreté, permettant ainsi de partager et de valider les justifications des choix de ces modèles et données en regard des scénarios de sûreté envisagés.

6.7 Le processus de revues internes et externes

En plus d'un processus de revue des exigences comme mentionné en section 6.2, l'Andra a mis en place un système de revues internes dédiées à l'analyse des données, modèles et choix de sûreté à retenir pour les évaluations de sûreté. Ces revues permettent de valider les choix et leurs justifications :

- institué par décret, le Conseil scientifique de l'Andra est chargé d'émettre des avis et recommandations sur les priorités des recherches menées par l'Andra et d'en évaluer les résultats, notamment en regard des enjeux d'acquisition ou d'utilisation des connaissances scientifiques et technologiques pour la conception et la sûreté du système de stockage. A ce titre, le Conseil scientifique a examiné systématiquement tout ou parties des dossiers antérieurs afférents ;
- en complément, l'Andra s'est attachée à soumettre certains travaux de conception et de sûreté à une évaluation indépendante dès que cela lui paraît pertinent. En effet, le développement de Cigéo fait l'objet d'un processus de revues de conception à chaque étape clé (esquisse, avant-projet sommaire, avant-projet détaillé..). Ce processus fait aussi intervenir des experts sûreté. A ce titre, depuis 2012, l'Andra a mis en place un Comité de sûreté faisant intervenir des experts externes de sûreté.

Différentes revues ou équivalents externes ont été et sont aussi menées :

- instaurée par la loi du 30 décembre 1991, la CNE évalue la qualité des travaux de l'Andra et produit un rapport annuel dans lequel elle émet un avis sur ces travaux. Ces avis et recommandations constituent des données d'entrées pour affiner les priorités du programme de recherche ;
- dans le cadre du processus de développement du projet Cigéo, depuis 1991, l'Andra a soumis à l'Autorité de sûreté nucléaire plusieurs dossiers intermédiaires, des avis et recommandations ont été formulés en vue de la demande d'autorisation. L'Autorité de sûreté effectue également des « visites de surveillance » notamment sur le Centre de Meuse/Haute-Marne au cours desquelles elle porte une appréciation sur la qualité de travaux en cours, en particulier dans le Laboratoire souterrain ;
- enfin, afin de vérifier la cohérence au regard des pratiques internationales, à la demande des ministères de tutelle de l'Andra, deux revues par les pairs ont été organisées respectivement en 2002 et 2005 par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE. A la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire, une revue est programmée en 2016 sous l'égide de l'AIEA (18)

VOLUME II - DESCRIPTION DU SYSTEME DE STOCKAGE

1

Les caractéristiques du site d'implantation

1.1	<i>Un contexte géologique simple et bien connu au travers d'importants travaux de reconnaissance</i>	82
1.2	<i>La justification des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien et de la localisation de Cigéo</i>	86
1.3	<i>Une représentation maîtrisée des écoulements des eaux dans les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien</i>	97
1.4	<i>Une géodynamique interne limitée et lente</i>	101
1.5	<i>Une formation stable dans un environnement qui évolue peu sur le prochain million d'années</i>	102
1.6	<i>L'absence de stérilisation de ressources naturelles</i>	108
1.7	<i>D'autres caractéristiques du site intervenant dans l'évaluation de sûreté</i>	109

La satisfaction des fonctions de sûreté s'appuie en premier lieu sur les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien à l'état naturel (19) (20) (21), appelées ainsi à jouer un rôle central sur le long terme.

L'Andra a mené d'importants travaux de reconnaissance depuis la surface et dans le Laboratoire souterrain sur le site d'implantation de Cigéo, en particulier sur le Callovo-Oxfordien. Les résultats de ces travaux montrent que le site d'implantation de Cigéo et plus particulièrement la formation du Callovo-Oxfordien dans laquelle est implantée l'installation souterraine de Cigéo répond aux critères techniques de site du guide de sûreté de l'ASN de 2008 (1) pour satisfaire l'objectif fondamental de protection du public et de l'environnement à long terme. Les critères du guide ASN de 2008 sont repris en annexe 6.

1.1 Un contexte géologique simple et bien connu au travers d'importants travaux de reconnaissance

1.1.1 Des campagnes d'investigations géologiques successives et des travaux scientifiques pour caractériser le site

La représentation du milieu géologique et plus particulièrement du Callovo-Oxfordien, est fondée sur l'acquisition de connaissances concernant son histoire géologique et ses caractéristiques dans son état actuel.

Celle-ci s'est appuyée jusqu'à 2005, sur des campagnes d'investigations géologiques et sur un important programme mené dans le Laboratoire Souterrain, à partir d'échantillons prélevés en forages, ou de mesures in situ.

Depuis 2005, la connaissance sur le milieu géologique a été précisée par la réalisation de deux campagnes sismiques respectivement 2D sur la zone de transposition (ZT) et 3D sur la zone sur laquelle l'installation souterraine de Cigéo sera implantée (« zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » : ZIRA). Elle a été complétée par la réalisation de 15 forages profonds répartis sur la zone de transposition. La poursuite des travaux dans le Laboratoire souterrain a aussi conduit à disposer de données complémentaires. L'ensemble de ces travaux permet une compréhension fine de l'environnement géologique du site de Meuse/Haute-Marne et fournit un modèle 3D du milieu géologique, au plus près de la réalité géologique.

L'ensemble des connaissances permet ainsi :

- de s'assurer que le Callovo-Oxfordien présente les propriétés attendues au regard des critères de choix de site du guide de sûreté de l'ASN (1);
- de justifier la localisation des installations de Cigéo, notamment les installations fond au sein du Callovo-Oxfordien, au regard de la satisfaction optimale de leurs fonctions de sûreté, en tenant compte des contraintes techniques et d'insertion dans le territoire ;
- d'évaluer le comportement à long terme du milieu géologique, notamment l'effet des éventuelles perturbations apportées par l'installation de stockage (ouvrages et colis de stockage) et l'effet des évolutions géodynamiques externe (climat) et interne.

On dispose ainsi d'une représentation d'ensemble et cohérente du site, notamment sur les plans sédimentologique, structural, hydrogéologique, géo-mécanique et géochimique, donnant une reconstitution de son histoire géologique passée jusqu'à l'état actuel et son évolution future. Cette représentation sert de base aux évaluations des performances du système de stockage.

1.1.2 L'histoire géologique du secteur de Meuse Haute-Marne

Géologiquement, le site de Meuse/Haute-Marne appartient à la bordure orientale du bassin de Paris. La structure générale du bassin se présente actuellement comme une cuvette, remplie d'une succession de couches sédimentaires, déposées entre 250 millions et 135 millions d'années avant l'ère actuelle,

dont les plus anciennes (Trias inférieur) affleurent sur les bordures et les plus récentes (Néogène) au centre du bassin, en Ile de France.

La série sédimentaire, épaisse de plus de 1800 m à l'aplomb du site, présente un pendage régulier de 1 à 1,5 degrés vers le Nord-Ouest, en direction du centre du bassin de Paris, complétée par une ondulation de faible amplitude orientée Est-Nord-Est/Ouest-Sud-Ouest (Figure 1.1-1).

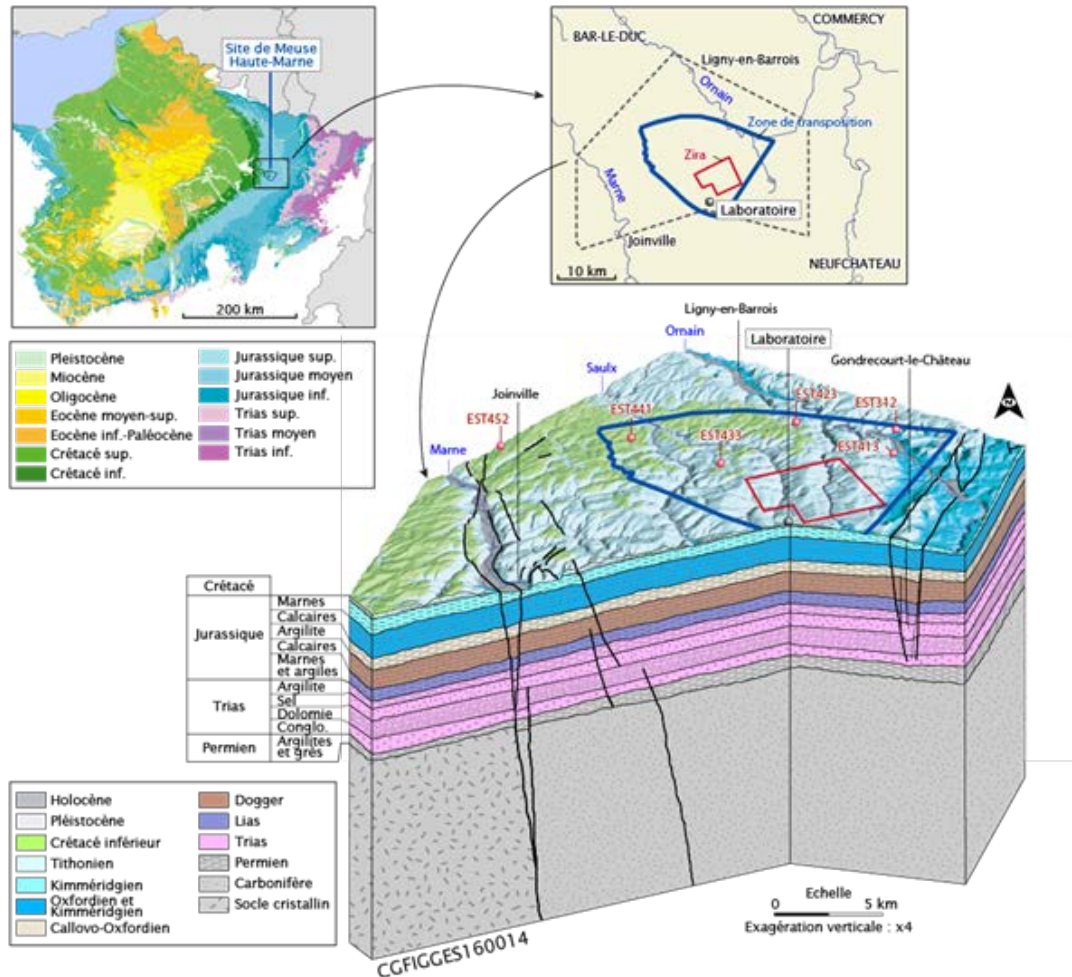


Figure 1.1-1 : Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse / Haute-Marne

La structure actuelle du bassin s'est formée progressivement durant l'ère Tertiaire (- 65 millions d'années) à la suite de différentes phases tectoniques (phase compressive pyrénéenne, phase d'extension de l'Oligocène et phase compressive alpine). Depuis, elle est peu affectée par la tectonique. Il s'agit d'une zone remarquable de la plaque Ouest européenne, où la lithosphère présente une épaisseur uniforme, et qui se distingue par son caractère pratiquement asismique.

Deux grandes familles de failles encadrent le secteur de Meuse/Haute-Marne (Figure 1.1-1) :

- les failles délimitant les fossés de Joinville au Sud-Ouest du secteur et de Gondrecourt au Sud-Est du secteur : elles ne s'enracinent pas dans le socle, découpent d'étroits fossés rectilignes dans la couverture sédimentaire jurassique et s'amortissent en profondeur dans les formations de base de la couverture sédimentaire (sel du Trias et argilites du Permien) ;
- les failles de la Marne : il s'agit d'accidents de socle.

A l'Ouest du secteur, ce système de failles régional est subdivisé en failles de petite dimension et forme une zone dite de fracturation diffuse avant de disparaître vers le Sud-Est, au-delà du fossé de Gondrecourt.

Situées à l'intérieur du bloc délimité par ces failles, la ZT (et de facto la ZIRA) constituent un domaine exempt de faille détectable dans la formation du Callovo-Oxfordien et ses encaissants, comme démontré aussi bien par les travaux de cartographie de surface que par les campagnes de sismique réflexion sur la ZIRA (seuil de détection de rejet de 2 à 5 m avec les techniques de traitement de la sismique 3D).

Dans la zone étudiée, la série sédimentaire est constituée d'une alternance de formations à dominante argileuse et de formations à dominante calcaire, à savoir de bas en haut (et d'Est en Ouest aux affleurements) :

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

L'alternance de formations argileuses tendres et de formations calcaires résistantes ainsi que le pendage général des couches vers l'Ouest et le Nord-ouest créent aux affleurements un relief typique de côtes. Ce relief est dû à une évolution continue depuis l'exondation du secteur, à la fin du Crétacé, liée à l'évolution tectonique, en particulier du fait de l'alternance de cycles glaciaires-interglaciaires depuis 3 millions d'années, notamment avec la mise en place et le retrait d'un pergélisol. Le modelé actuel comprend ainsi, (i) au Sud et à l'Est du secteur, le plateau de l'Oxfordien carbonaté, formant les côtes de Meuse, (ii) vers l'Ouest, la dépression marneuse correspondant au Kimméridgien, au sein de laquelle les intervalles de calcaires argileux forment de petites buttes très visibles dans le paysage, (iii) les calcaires du Barrois, sous la forme d'un vaste plateau sur lequel est implanté le Laboratoire souterrain et se situe la ZIRA, couronné par les placages de Crétacé inférieur et entaillé par des rivières.

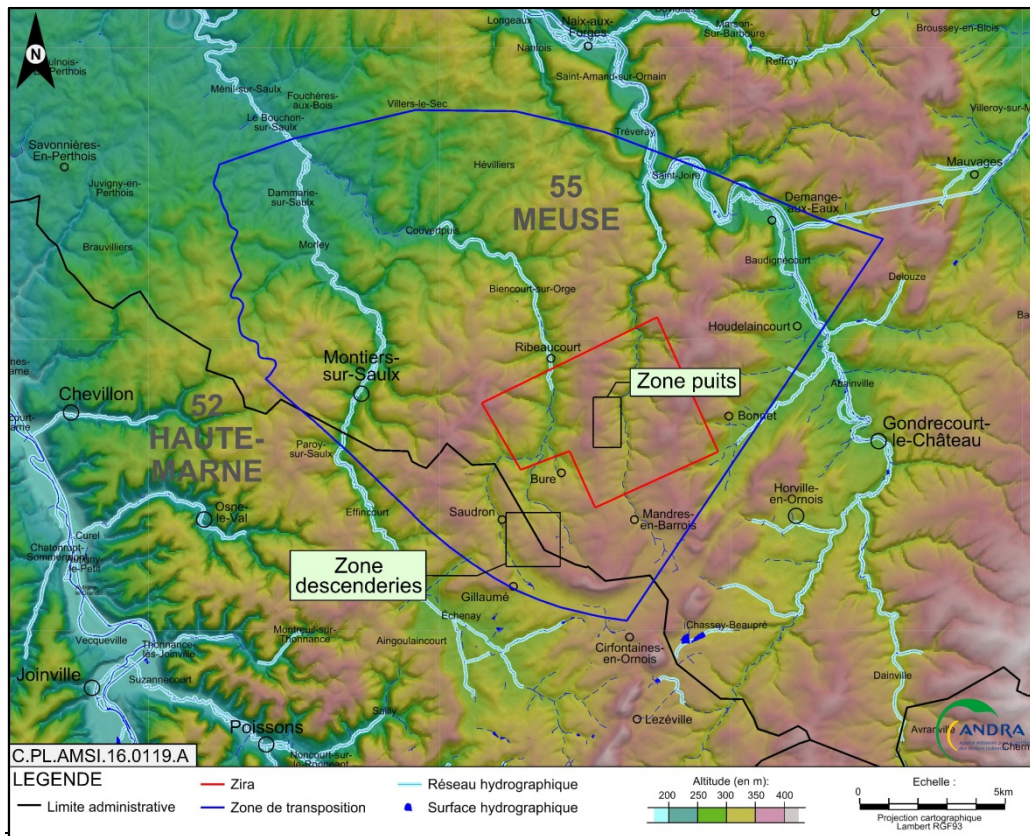


Figure 1.1-2 : Carte topographique du territoire autour de la ZIRA

1.2 La justification des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien et de la localisation de Cigéo

1.2.1 Une formation de grande épaisseur et localisée à une profondeur importante

Sur la ZIRA, la profondeur du Callovo-Oxfordien, et donc de l'installation souterraine de Cigéo, bien en deçà de 200 m ⁽¹⁷⁾ protège le système de stockage des phénomènes d'érosion (voir infra, § 1.5.2), de l'effet d'un séisme, ou d'une intrusion humaine « banale », et garantit la satisfaction de la fonction « isoler les déchets ».

La géométrie du Callovo-Oxfordien en couche sub-plane et son épaisseur d'au moins 140 m sur la ZIRA (voir infra) permettent d'y accueillir l'installation souterraine et, associées à une architecture planaire de cette dernière, d'y ménager au-dessus et en-dessous des gardes de Callovo-Oxfordien ayant des épaisseurs importantes. Ces gardes font partie intégrante du système de stockage et contribuent fortement au confinement des radionucléides et toxiques contenues dans les déchets, sur de longues échelles de temps.

Les limites géométriques et les profondeurs du Callovo-Oxfordien, ainsi que les incertitudes associées, sont bien définies, identifiées et quantifiées à l'intérieur de la ZT, et plus particulièrement de la ZIRA grâce à la sismique 3D et aux corrélations avec les nombreux forages :

- le toit (sommet) et le mur (base) de la formation du Callovo-Oxfordien sont respectivement assimilés aux surfaces SNC (surface de non-conformité) et LS0 (limite de séquence 0). Ces surfaces sont reconnues directement, au droit des forages disponibles à l'extérieur de la ZIRA, et indirectement par interprétation des campagnes de sismique 2D et 3D sur la ZT et sur la ZIRA. Le pendage de ces surfaces est en moyenne de 1,9 % et inférieure à 2,8 % pour la majorité des valeurs (90 %) ;
- sur la ZIRA, l'épaisseur de la formation du Callovo-Oxfordien (Figure 1.2-1) varie d'environ 140 m à 160 m du Sud-Ouest vers le Nord-Est, conformément à la principale direction des apports de sédiments ;
- le toit de la formation du Callovo-Oxfordien est situé entre environ 340 et 530 m de profondeur, son milieu géométrique entre environ 420 et 600 m (Figure 1.2-2) et son mur entre environ 500 m et 675 m ;
- la formation du Callovo-Oxfordien se présente comme une couche faiblement inclinée vers le Nord-Ouest (1° en moyenne).

¹⁷ Le guide de sûreté ASN 2008 mentionne que « (l'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est a priori de l'ordre de 200 mètres »

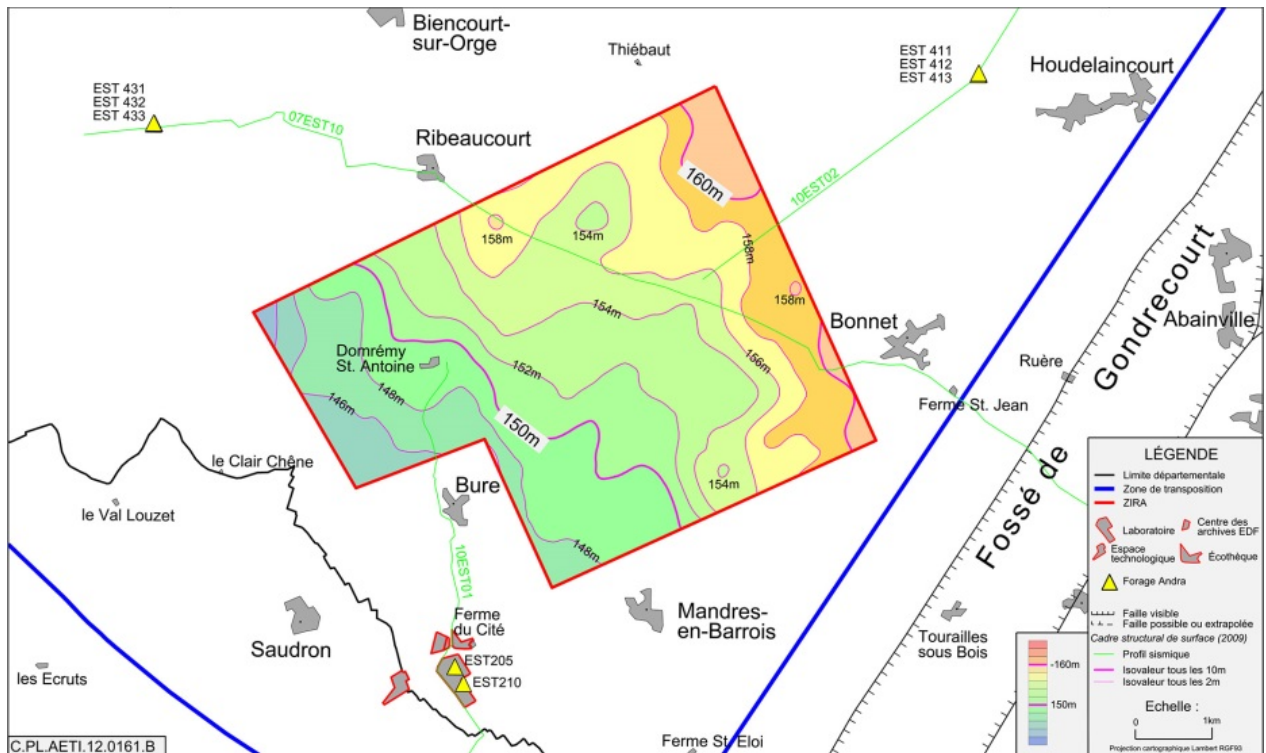


Figure 1.2-1 : Epaisseur (m) du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA (comptée entre les surfaces SNC et LSO)

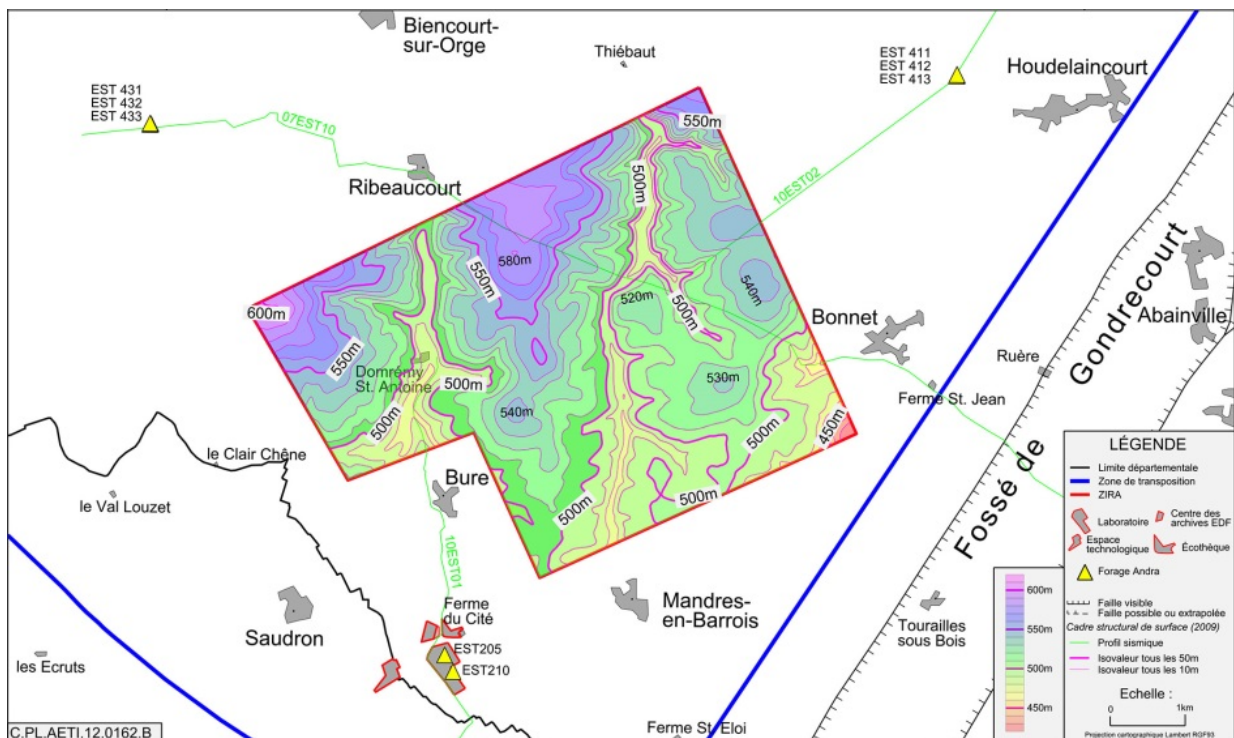


Figure 1.2-2 : Profondeur (m) du milieu géométrique du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA (comptée par rapport à la topographie)

- En regard de la proximité des forages (i.e. points) de calage et de leur nombre sur la ZT et de la résolution de la sismique 3D sur la ZIRA, les incertitudes résiduelles sur les paramètres géométriques du Callovo-Oxfordien sont quantifiées et maîtrisées : de l'ordre de 10 m au

maximum respectivement pour la profondeur des limites géométriques du Callovo-Oxfordien et de 6 m au maximum pour son épaisseur sur la ZIRA.

1.2.2 Une formation de grande continuité latérale

Latéralement, le Callovo-oxfordien présente globalement une même organisation verticale sur une zone de plus de 350 km² englobant la ZT ; cette organisation est en effet quasi identique dans tous les forages situés dans un rayon de 15 km autour du Laboratoire souterrain, d'après les enregistrements diagraphiques et la composition minéralogique (Figure 1.2-3).

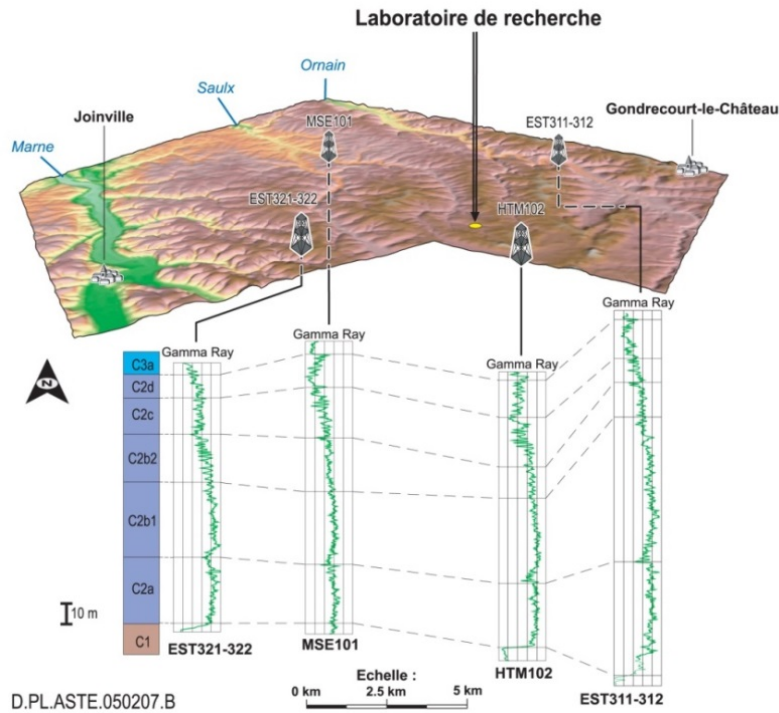


Figure 1.2-3 : Illustration de l'homogénéité latérale de l'organisation verticale du Callovo-Oxfordien sur le secteur étudié (enregistrement diagraphique Gamma Ray)

La continuité lithologique du Callovo-Oxfordien latéralement sur de grandes distances s'explique par l'origine des sédiments qui le composent et le contexte tectonique et sédimentaire calme de leur dépôt, il y a environ 155 millions d'années. Ce contexte permet de prédire sur la zone de transposition l'absence de hiatus de sédimentation d'une ampleur susceptible de perturber la continuité verticale et latérale du Callovo-Oxfordien, ainsi que l'absence de lentilles sableuses (turbidites), étant donné l'éloignement des sources d'apport.

Les sédiments se sont déposés sous une profondeur d'eau de l'ordre de la centaine de mètres durant les périodes de haut niveau marin, dans un milieu marin ouvert et calme; les zones émergées les plus proches, constituant les sources d'apports en sédiments, se situaient dans le massif « Londres-Brabant », correspondant aux actuelles Ardennes. L'éloignement de ces sources d'apport explique la granulométrie fine des constituants minéralogiques. Le Callovo-Oxfordien montre ainsi trois phases minéralogiques principales : une phase argileuse dominante (en moyenne de 40 à 45 %), une phase carbonatée (calcite essentiellement, avec quelques pourcents de dolomie) et une phase quartzeuse (de granulométrie fine : silts). Les faibles variations de proportions de ces phases minéralogiques sont associées aux fluctuations du niveau marin relatif. Ces variations couplées à l'enfouissement du Callovo-Oxfordien par le passé sont les principales causes de variations pétro-physiques du Callovo-Oxfordien. Néanmoins, les phénomènes diagénétiques tardifs, discrets et d'extension régionale n'ont pas été en mesure de modifier localement et de manière significative les caractéristiques du Callovo-Oxfordien.

Par ailleurs, le Callovo-Oxfordien contient entre 0,5 et 1 % de matière organique. La prédominance et la persistance des biomarqueurs dans les molécules hydrocarbonées, l'abondance de formes thermiquement instables manifestent l'immaturation de cette matière organique. Cela indique que la température du Callovo-Oxfordien est restée basse (de l'ordre de 45 °C) au cours de son histoire, ce qui est conforme à son enfouissement maximum au Crétacé.

L'analyse géostatistique quantitative de la variabilité des propriétés physiques mesurées en diagraphies et des données minéralogique et sédimentologique observées sur échantillons permet de représenter le Callovo-Oxfordien en trois grandes unités géologiques qui sont de bas en haut (Figure 1.2-4) :

- l'unité argileuse (UA) la plus épaisse (100 à 120 m environ), la plus homogène et la plus riche en minéraux argileux (plus de 40 % en moyenne). Elle intègre le Repère Inférieur Oolithique (RIO) plus carbonaté, à la transition Callovien/Oxfordien, et représente environ les 2/3 inférieurs de la formation du Callovo-Oxfordien. Elle peut être scindée en trois sous-unités aux variations ténues et progressives. La sous-unité UA2 correspond au niveau stratigraphique où la teneur en argile est la plus élevée et dans laquelle les différentes expérimentations du Laboratoire souterrain ont lieu ;
- l'unité de transition (UT). Elle constitue le terme de passage entre les roches principalement argileuses de l'UA et les roches de l'unité silto-carbonatée (USC) aux teneurs en carbonates les plus élevées (de 40 à 90 %) ;
- l'unité silto-carbonatée (USC), de vingt à trente mètres d'épaisseur, avec une importante variabilité pétro-physique verticale liée aux alternances lithologiques (marnes et siltites carbonatées). Elle représente des niveaux dont la composition minéralogique est plus contrastée et hétérogène. Ces unités représentent une alternance de siltites carbonatées et de marnes. L'enrichissement progressif en carbonates dans cette unité marque l'installation de la plateforme carbonatée de l'Oxfordien supérieur. Cette unité intègre le niveau carbonaté RSO (Repère Supérieur Oolithique).

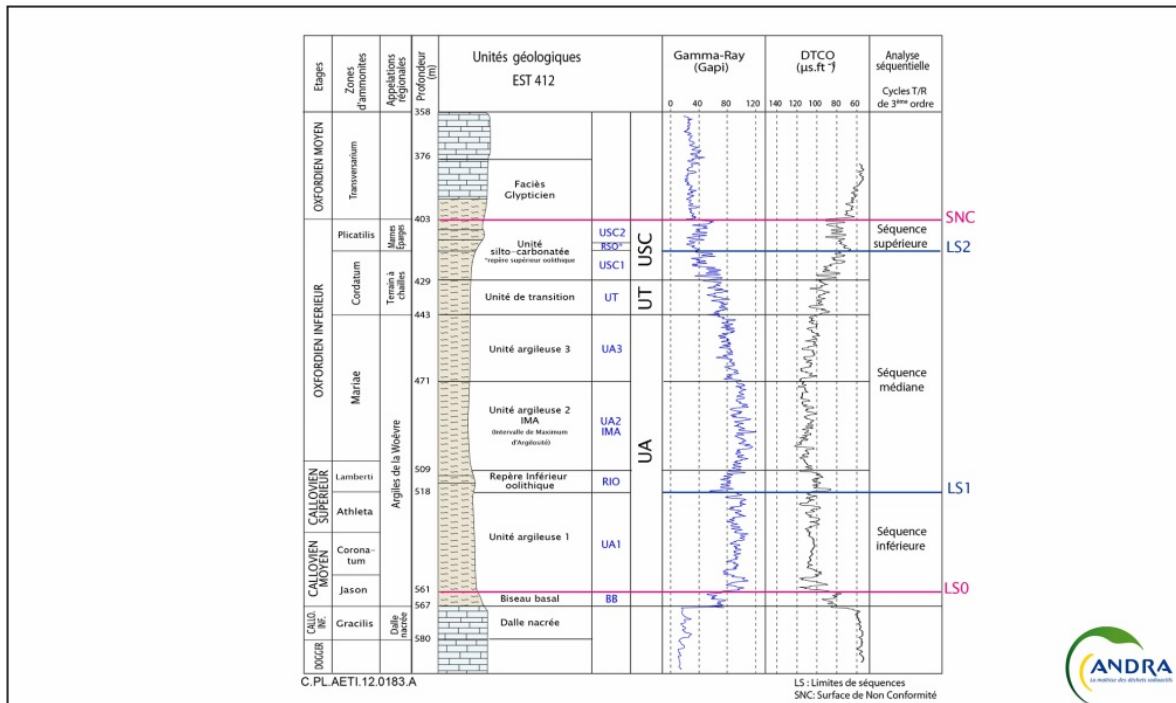


Figure 1.2-4 : Principales unités géologiques du Callovo-Oxfordien : unité argileuse (UA), unité de transition (UT) et unité silto-carbonatée (USC). Les limites géologiques du Callovo-Oxfordien sont données par les surfaces LS0 et SNC

1.2.3 Une formation exempte d'hétérogénéités structurales

L'examen détaillé de 350 km de profils sismiques sur le secteur montre que les déformations tectoniques qui ont affecté la région depuis 150 millions d'années sont faibles et se limitent aux grandes structures présentes en bordure de la ZT (fossé de Gondrecourt et fossé de la Marne). Entre ces structures, le Callovo-Oxfordien est régulier et à faible pendage.

Au regard des résultats des investigations menées par l'Andra (sismiques 2D et 3D, forages, notamment les forages déviés dans le Callovo-Oxfordien aux abords du Laboratoire souterrain), aucune faille majeure (de rejet vertical supérieur à 10 m et d'extension décakilométrique) ou secondaire (de rejet supérieur à 5 m et d'extension plurikilométrique) n'a été observée sur la zone de transposition dans le Callovo-Oxfordien, ni dans les formations calcaires sus-jacentes.

Sur le site du Laboratoire souterrain, les forages déviés n'ont traversé aucune faille mineure (extension de quelques centaines de mètres maximum et rejet vertical 2 à 3 m inférieur au seuil de détection des méthodes de sismique réflexion 2D et 3D, malgré leur orientation perpendiculaire aux deux directions structurales et leur longueur cumulée subhorizontale de plus de 1500 m. Par ailleurs, aucune faille mineure n'a été recoupée par les galeries du Laboratoire souterrain dont la longueur cumulée est d'environ 1600 m à ce jour.

Les structures observées dans les forages sont localisées au toit du Callovo-Oxfordien ; elles correspondent principalement à des diaclases ou joints, des fentes de tension et quelques rares joints stylolithiques sub-verticaux. Elles sont peu nombreuses, sans déplacement, et pour la plupart colmatées (notamment par de la calcite ou de la célestite). Elles n'affectent pas la géométrie du Callovo-Oxfordien ni sa perméabilité.

1.2.4 Des propriétés qui favorisent l'immobilisation et la rétention des radionucléides

Les propriétés physico-chimiques du Callovo-Oxfordien sont la conséquence de la nature des minéraux constitutifs, en particulier les minéraux argileux et les minéraux carbonatés, et de leur agencement. Ce dernier délimite des vides (les pores) où se situe l'eau interstitielle qui contient des espèces chimiques et des gaz dissous, susceptibles de se déplacer par convection ou par diffusion. La porosité (volume de vides rapporté au volume total) varie entre 14 % dans les niveaux les plus carbonatés du Callovo-Oxfordien et 19,5 % dans les niveaux les plus argileux. Les pores sont de dimension nanométrique avec une taille dominante d'environ 20 nm. Du fait de cette petite taille, l'eau est structurée entre de l'eau dite liée en surface des pores et de l'eau dite libre au centre de ceux-ci. L'eau liée correspond à une proportion d'environ 50 % de l'eau porale, forme des films continus et ne peut pas être déplacée sous l'effet d'un gradient (différence) de pression.

1.2.4.1 Une composition chimique des eaux bien connue et favorisant la faible solubilité de l'essentiel des radionucléides

La connaissance de la composition chimique de l'eau interstitielle a été progressivement affinée au moyen d'analyses sur échantillons d'argilites et d'expérimentations in situ dans le Laboratoire souterrain, suivant différents protocoles, et de modélisations géochimiques.

Certaines caractéristiques du système chimique de l'eau porale sont particulièrement déterminantes vis-à-vis du comportement des radionucléides : le pH, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh), les concentrations en ligands naturels (CO_3 , SO_4 , Cl, molécules organiques...) et les concentrations en cations compétiteurs pour les sites de sorption des argiles (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+2} ,...). Ces dernières ont été précisées, notamment grâce aux résultats de l'expérimentation PAC (Prélèvements pour Analyse Chimique) dans le Laboratoire souterrain qui a permis de vérifier la validité du modèle de composition géochimique de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien. Celui-ci permet de fournir en tout point du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition une fourchette de valeurs resserrée pour les différents paramètres qui déterminent la composition chimique de l'eau interstitielle, et d'établir cette composition chimique sur toute l'épaisseur de la formation, en cohérence avec l'évolution lithologique globale de celle-ci. L'eau interstitielle a un pH neutre, légèrement supérieur à 7. Elle est réductrice (Eh de -180 à -200 mV), comme le montre la présence de pyrite stable et de matière organique. Chimiquement, cette eau a un caractère calco-sodique carbonaté, avec également une composante

sulfatée et chlorurée. Les données sur les isotopes stables du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) des bicarbonates dissous confortent l'hypothèse de l'équilibre chimique et isotopique de l'eau interstitielle avec les phases minérales carbonatées (calcite, dolomite, ankérite).

L'évaluation de la solubilité, de la spéciation aqueuse et du degré d'oxydation de chaque radionucléide et toxique chimique a été effectuée à l'aide de la modélisation thermodynamique, suivant une démarche d'analyse de sensibilité afin de couvrir une gamme des compositions plausibles. Globalement, dans les conditions de pH (neutralité) et d'Eh (milieu réducteur) imposées par le Callovo-Oxfordien, la plupart des radionucléides ont des solubilités faibles, notamment les actinides et les lanthanides. Seuls, les halogénures (Br, I, Cl) qui ne sont pas directement contrôlés par l'équilibre vis-à-vis d'une phase minérale, sont totalement solubles.

1.2.4.2 Une capacité de rétention par sorption avérée

Les capacités de rétention du Callovo-Oxfordien proviennent des minéraux argileux qui interagissent fortement par sorption avec les radionucléides. La caractérisation, la compréhension et la représentation des propriétés de rétention par sorption des argilites du Callovo-Oxfordien s'appuient sur différents programmes expérimentaux et une démarche de modélisation intégrant les différents processus géochimiques.

La détermination des coefficients de partage solide-solution (K_d) des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien s'appuie majoritairement sur des mesures obtenues à partir d'expériences de rétention en système « batch ». L'incertitude de mesure est estimée inférieure à 30 %. Pour les ions alcalins et alcalino-terreux (rétention par échange cationique) une variabilité d'un facteur 3 en lien avec la variabilité de la teneur et de la nature de la fraction argileuse est observée. La sorption est représentée pour la majorité des radionucléides par un modèle d'isotherme d'adsorption linéaire (K_d constant).

Les niveaux de rétention mesurés dans le Callovo-Oxfordien dépendent essentiellement de la nature des espèces. Ils sont peu variables au regard de la variabilité spatiale verticale du Callovo-Oxfordien (minéralogie). Des valeurs de rétention très importantes (K_d supérieurs à $1 \text{ m}^3/\text{kg}$) ont été mesurées pour la plupart des actinides et lanthanides majeurs. La plupart des métaux de transition ainsi que l'uranium et le césium présentent des valeurs de rétention élevées (K_d de l'ordre de $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ ou plus). Seuls le chlore et l'iode ne présentent pas de rétention dans les argilites (en regard des incertitudes expérimentales).

Pour certains radionucléides, en l'absence de données expérimentales, la détermination de leur coefficient de partage s'appuie sur (i) des analogies de matrices minérales (argiles à Opalines), (ii) des analogies de comportement entre les différents radionucléides, (iii) le résultat de modélisations géochimiques supportées par un ensemble de données expérimentales.

1.2.5 Des caractéristiques hydrauliques qui limitent les circulations d'eau

Le Callovo-Oxfordien présente des caractéristiques hydrauliques (perméabilité et gradient de charges hydrauliques) qui limitent les flux d'eau au sein même du Callovo-Oxfordien et éventuellement dans l'installation souterraine à long terme après sa fermeture.

1.2.5.1 Une très faible perméabilité à l'eau établie

La perméabilité du Callovo-Oxfordien découle de la structuration de la porosité et de la répartition des minéraux présents, plus précisément de la surface relative des sections de pores où se trouve l'eau libre et de leur degré de connectivité. Elle a été mesurée sur de nombreux échantillons (> 200), orientés parallèlement ou perpendiculairement à la stratification et de taille pluricentimétrique et sur des essais in situ à une échelle pluridécimétrique à plurimétrique en forage et dans le Laboratoire souterrain. Deux méthodes de mesure ont été mises en œuvre : une méthode « pulse test » basée sur le régime transitoire (mesures sur échantillon et in situ) nécessitant un modèle d'interprétation et une méthode en régime permanent (sur échantillons). Les mesures ont fait l'objet d'analyses statistiques et géostatistiques, en distinguant la méthodologie utilisée et en prenant en compte les incertitudes métrologiques. Il en découle que :

- la perméabilité est très faible, ce qui s'explique notamment par la nature argileuse du Callovo-Oxfordien et la finesse et le très petit diamètre de pores ;
- aucune variabilité verticale ou latérale significative de la perméabilité n'est observée à l'échelle du Callovo-Oxfordien, en regard de l'incertitude de mesure (inférieures à 1 ou 2 ordres de grandeurs pour les essais *in situ* et sur échantillons, avec la méthode « pulse test ») ;
- les mesures acquises par pulse-test :
 - ✓ présentent une grande variabilité ;
 - ✓ sont supérieures d'un ordre de grandeur en moyenne à celles acquises en régime permanent ;
 - ✓ présentent un rapport d'anisotropie entre la perméabilité horizontale (K_h) et la perméabilité verticale (K_v) faible (de l'ordre de 2 à 3) ;
 - ✓ présentent des valeurs médianes de (K_v) et (K_h) respectivement de l'ordre de 2.10^{-13} m/s et 4.10^{-13} m/s ;
- les mesures acquises en régime permanent présentent une (très) faible variabilité, avec une faible anisotropie, et la valeur médiane est de l'ordre de 4.10^{-14} m/s.

1.2.5.2 Des gradients hydrauliques durablement faibles dans la formation

Les gradients de charge hydraulique verticaux à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien sont déterminés par la mesure des charges dans les encaissants (Oxfordien carbonaté et Dogger). Les données ont été acquises au cours des campagnes de reconnaissance successives, sur différents points de mesure et en utilisant différentes méthodes. Les incertitudes de mesure sont inférieures au mètre.

Les mesures mettent en évidence un gradient de charge relativement faible entre les formations sus et sous-jacentes (globalement compris entre de - 0,1 m/m et + 0,1 m/m sur la ZIRA avec une incertitude inférieure à 0,05 m/m). Les iso-gradients de charge hydraulique mesurés et simulés dans le Callovo-Oxfordien sont illustrés dans la figure ci-après.

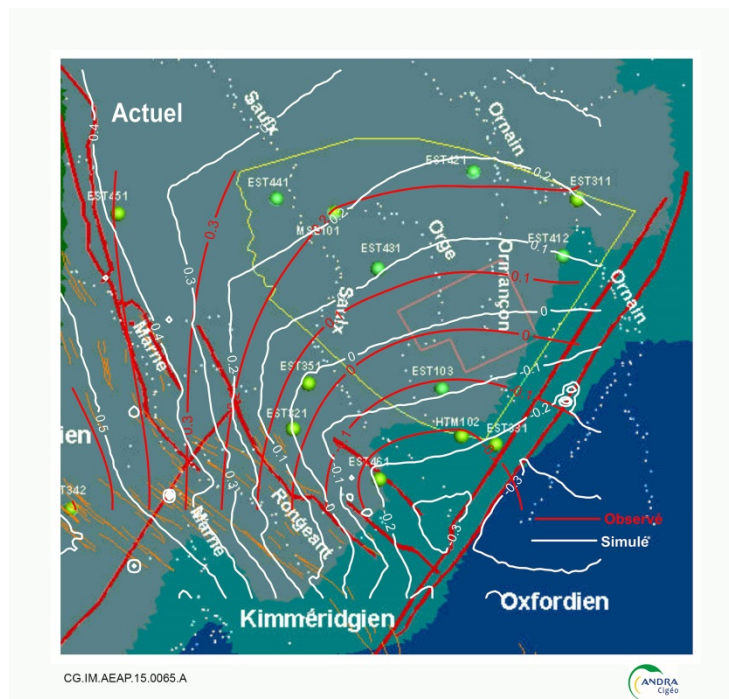


Figure 1.2-5 : Lignes d'iso-gradient vertical de charge hydraulique à l'échelle du Callovo-Oxfordien

Les mesures de charges hydrauliques dans le Callovo-Oxfordien révèlent l'existence d'une surpression par rapport au profil de charges hydrauliques déterminé par les charges au toit et au mur du Callovo-Oxfordien respectivement dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger. Cette surpression n'est pas homogène dans le Callovo-Oxfordien : elle s'organise suivant un profil vertical en cloche dissymétrique

vers le toit du Callovo-Oxfordien, avec une valeur maximale d'environ 40 m (à comparer aux valeurs de charges dans le Dogger et l'Oxfordien carbonaté respectivement de l'ordre de 290 m NGF et 305 m).

L'existence de surpression dans des formations argileuses profondes des bassins sédimentaires est fréquente et différentes hypothèses sur son origine ont été identifiées (osmose chimique, variation de conditions aux limites hydrauliques ou mécaniques au toit et au mur...). L'origine de la surpression dans le Callovo-Oxfordien n'est pas encore totalement explicitée, mais son existence est un indicateur de la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien. Quelle que soit leur origine, ces surpressions ont un effet négligeable sur les écoulements d'eau et le transfert des radionucléides.

Il apparaît ainsi que l'ensemble des mesures acquises par diverses méthodes confirment la très faible perméabilité à l'eau du Callovo-Oxfordien et le faible gradient hydraulique vertical dans la formation ; il en résulte des vitesses de déplacement de l'eau au sein du Callovo-Oxfordien très faibles, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres par 100 000 ans, soit environ plus de 40 à 50 millions d'années pour traverser entièrement le Callovo-Oxfordien.

1.2.6 Des propriétés diffusives qui limitent la migration des radionucléides

1.2.6.1 Des coefficients de diffusion faibles

Les propriétés de diffusion du Callovo-Oxfordien ont été étudiées pour différents traceurs. Le comportement diffusif d'un ensemble de traceurs anioniques (chlore, iode), cationiques (césium, sodium, strontium, calcium, europium...) et neutres (eau tritiée HTO) a été intensivement étudié au travers d'essais de diffusion sur des échantillons de taille centimétrique. Pour HTO, plus de 130 mesures ont été réalisées, 70 mesures pour le chlore et 30 pour l'iode. La variabilité spatiale des résultats est relativement faible. Par ailleurs, des essais d'injection de traceurs réalisés *in situ* dans le Laboratoire souterrain (expérimentations DIR « Diffusion de traceurs Inertes et Réactifs ») sur une durée de plusieurs années et des essais maquettes (échantillons décimétriques) confirment les valeurs obtenus sur échantillons carottés.

Les mesures mettent en évidence une différence de comportement attendue entre anions, cations et espèces neutres du fait de leurs interactions physico-chimiques avec les surfaces chargées des minéraux argileux. Les anions sont repoussés des surfaces argileuses (chargées négativement), ce qui les exclut d'une partie du réseau de pores : il s'agit du phénomène d'exclusion anionique, et il en résulte des coefficients de diffusion (et des porosités accessibles à la diffusion) plus faibles que ceux mesurés pour HTO. Les cations sont en revanche adsorbés sur les surfaces argileuses, d'où des coefficients de diffusion effectifs (D_e) sensiblement plus élevés que celui de HTO (jusqu'à 10 fois pour le césium) en fonction de l'affinité du cation avec les surfaces argileuses, mais qui reste faible. Ainsi, le chlore, espèce anionique, présente un D_e de 5.10^{-12} m²/s et le césium, espèce cationique, un D_e de $2,5.10^{-10}$ m²/s.

1.2.6.2 Des porosités accessibles à la diffusion « petite »

La porosité totale a été mesurée sur échantillons par mesures de teneur en eau et en forages par diagraphies de Résonnance Magnétique Nucléaire, fournissant des mesures nombreuses et représentatives de la variabilité lithologique du Callovo-Oxfordien, avec une incertitude très faible (de l'ordre du pourcent). La porosité totale sert de valeur de référence pour la porosité accessible à la diffusion des radionucléides ; en effet, du fait de l'exclusion anionique, la porosité dans laquelle peuvent diffuser les radionucléides sous forme anionique est plus petite que la porosité totale.

Les porosités accessibles aux radionucléides anioniques, neutres et cationiques sont déterminées par interprétation des essais de diffusion des traceurs de référence des radionucléides anioniques (le chlorure) et neutres (HTO).

Les valeurs de porosité accessible à la diffusion mesurées par essais de diffusion de l'eau tritiée sont cohérentes avec les valeurs de porosité totale, alors que celles mesurées avec le chlorure sont plus faibles que la porosité totale, pour la plupart comprises entre 4 et 10 %, et présentent une dispersion sur l'ensemble de la formation.

1.2.6.3 Un transfert dominant des solutés dans le Callovo-Oxfordien par diffusion

L'analyse des caractéristiques hydrauliques et de diffusion du Callovo-Oxfordien ainsi que la répartition naturelle de certains solutés (ions, gaz dissous et isotopes) dans le Callovo-Oxfordien conduit à considérer qu'en relatif la diffusion est le processus de transfert dominant des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien. Il s'agit néanmoins d'un transfert très lent du fait des faibles coefficients de diffusion : les temps d'atteinte des maxima de débit molaire pour un radionucléide anionique non sorbé et fortement soluble (comme le chlore 36), depuis le stockage vers le toit du Callovo-Oxfordien avec une garde supérieure de Callovo-Oxfordien d'environ 60 m, sont de l'ordre de 750 000 ans.

Les Figure 1.2-6 et Figure 1.2-7 ci-dessous illustrent les temps caractéristiques de transfert diffusif (ici correspondant à l'occurrence de maximum de débit molaire au toit et au mur du Callovo-Oxfordien) respectivement de l'uranium 238 et l'iode 129, évalués sur la base (i) d'un stockage de 10 mètres d'épaisseur implanté en milieu géométrique du Callovo-Oxfordien, (ii) de valeurs de paramètres de propriétés de diffusion et de rétention phénoménologiques. On observe que dans le contexte diffusif dominant, la capacité de sorption contribue significativement à retarder l'arrivée des radionucléides au toit ou au mur du Callovo-Oxfordien (uranium 238 versus iode 129 qui n'est pas retenue dans les argilites).

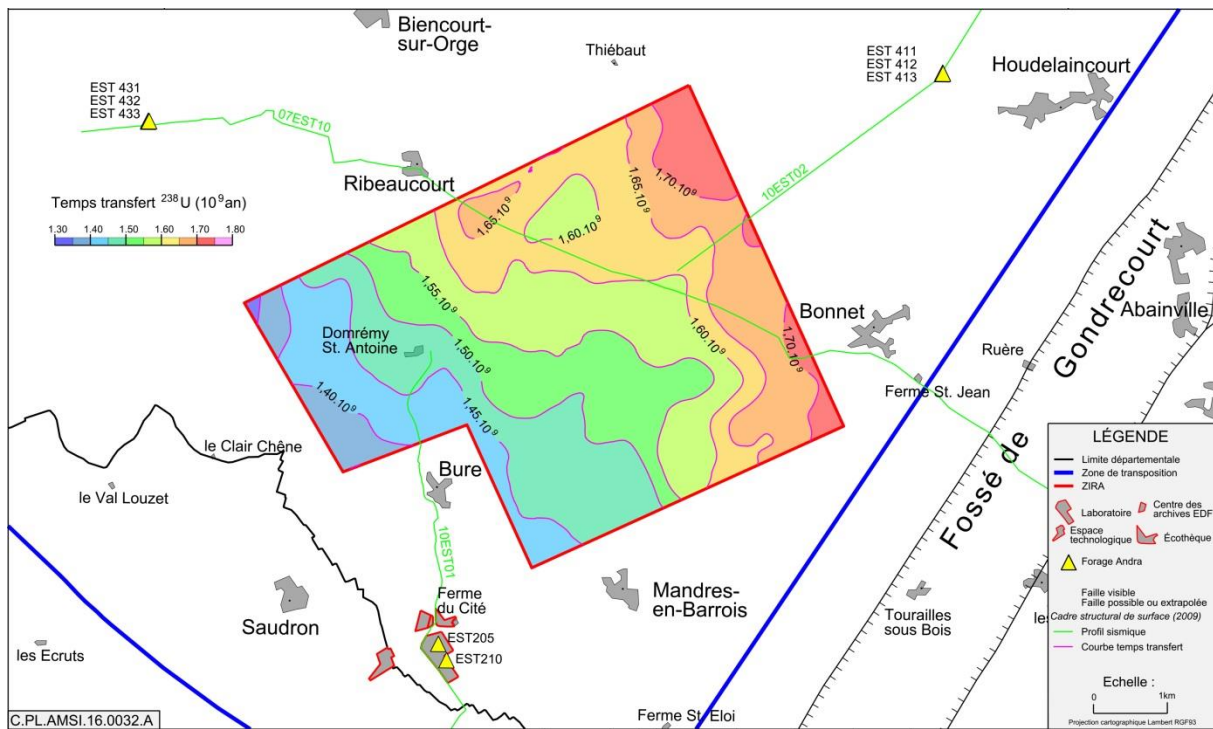


Figure 1.2-6 : Cartographie des temps de transfert de ^{238}U pour un stockage implanté au milieu du Callovo-Oxfordien

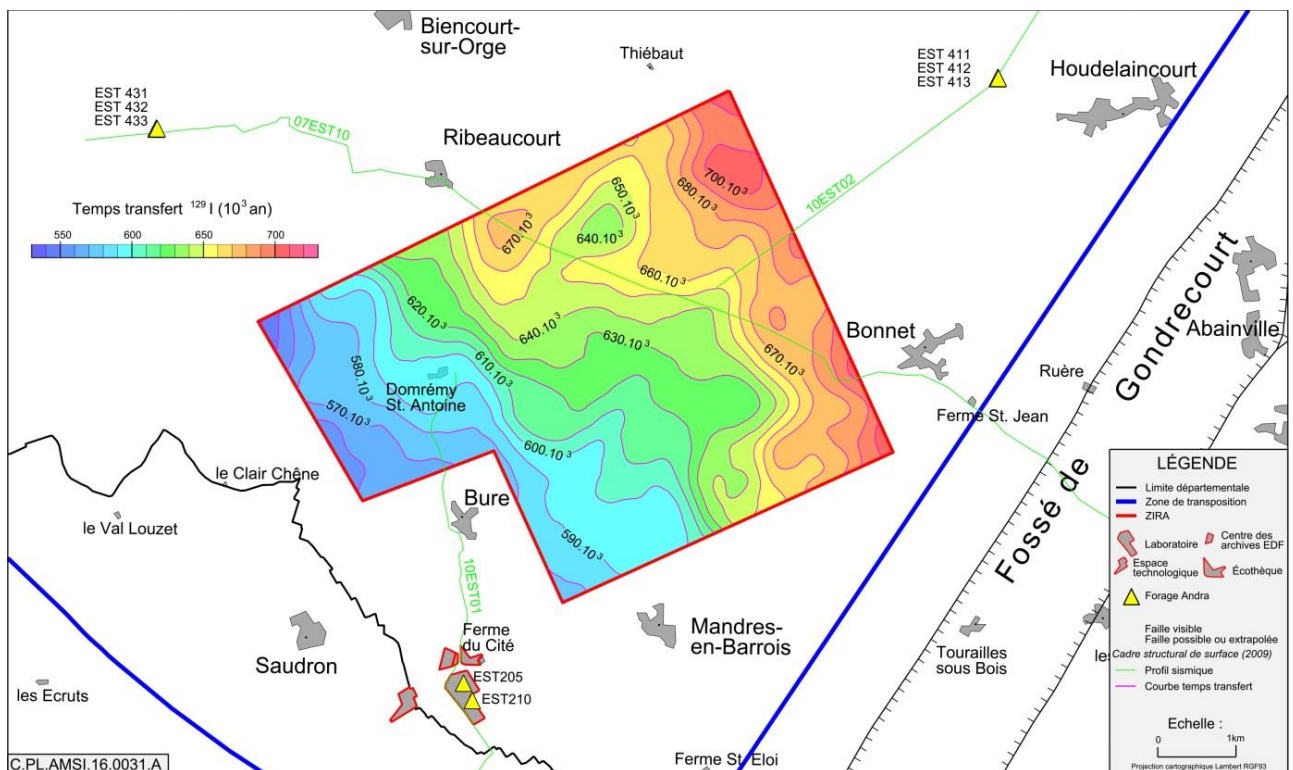


Figure 1.2-7 : Cartographie des temps de transfert de ^{129}I pour un stockage implanté au milieu du Callovo-Oxfordien

1.2.7 Des propriétés mécaniques propres suivant l'unité lithostratigraphiques : l'absence d'endommagement marqué et/ou une cicatrisation hydraulique de l'endommagement

Des résistances mécaniques propres entre les argilites de l'UA et celles de l'USC

Les caractéristiques minéralogiques des unités lithostratigraphiques du Callovo-Oxfordien confèrent aux argilites correspondantes des propriétés mécaniques et des capacités de cicatrisation propres. Du fait de la teneur importante de carbonates et de leur organisation en un quasi squelette 3D, les argilites de l'USC présentent ainsi une résistance mécanique supérieure à celle des argilites de l'UA pour lesquelles les minéraux non argileux, en particulier les carbonates, s'organisent en inclusion au sein d'une matrice argileuse.

Des endommagements propres entre les argilites de l'UA et celles de l'USC

Dans l'USC, où la résistance des argilites est élevée, on observe peu d'endommagement lors du creusement d'ouvrages souterrains, avec quelques fissures d'extension (pluri centimétrique) et de la microfissuration, l'ensemble ne présentant pas de continuité le long des ouvrages.

Dans l'UA, où la résistance des argilites est plus faible, on observe en revanche un endommagement localisé important, avec l'apparition de fractures en cisaillement en avant du front de creusement, et des fractures en extension après le passage du front. Quel que soit le diamètre de l'ouvrage (dans le domaine testé au Laboratoire souterrain), il se forme ainsi un même réseau de fractures organisé en deux zones depuis la paroi :

- une zone fracturée connectée, dite ZFC. Dans cette zone, plusieurs familles de fractures coexistent : des fractures en cisaillement et des fractures en extension, mais aussi des fractures mixtes, principalement des fractures créées en cisaillement et qui s'ouvrent ensuite sous l'effet de la convergence de l'ouvrage. L'ensemble forme un réseau 3D dense de fractures. L'ouverture géométrique locale des fractures varie beaucoup, et peut atteindre plusieurs millimètres à la paroi ou très proche de la paroi ;

- une zone avec une fracturation « discrète », dite ZFD. Au-delà de la zone fracturée connectée, il subsiste uniquement les extrémités de fractures en cisaillement. Les fractures ne se sont pas physiquement connectées entre elles et présentent des ouvertures infra-millimétriques.

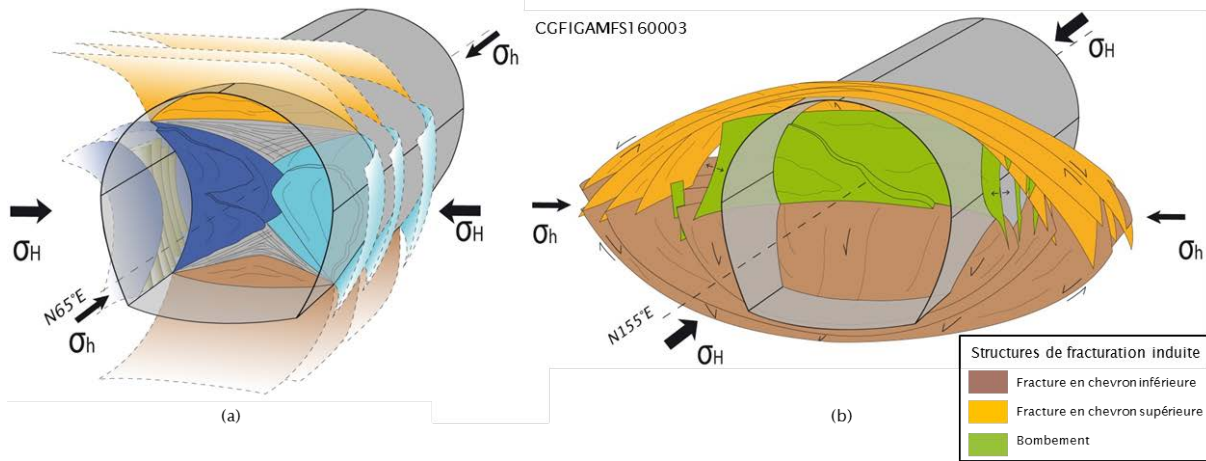


Figure 1.2-8 : Représentation de la fracturation induite autour des ouvrages suivant leurs orientations par rapport à la contrainte horizontale majeure (a) Galerie orientée suivant la contrainte horizontale mineure (b) Galerie orientée suivant la contrainte horizontale majeure

Une organisation spatiale de l'endommagement autour des ouvrages horizontaux creusés dans l'UA variables suivant l'orientation des ouvrages

L'analyse des facteurs influençant la fracturation, menée à partir de l'ensemble des données acquises au niveau principal du Laboratoire souterrain, i.e. dans l'UA, montre que la nature de la fracturation induite dépend peu de la direction de creusement, à l'inverse de l'extension de la zone fracturée qui dépend fortement de l'orientation de l'ouvrage horizontal par rapport à la contrainte horizontale majeure : pour des ouvrages orientés selon la contrainte horizontale mineure (N65°E), l'extension de la zone endommagée se développe préférentiellement suivant la verticale, tandis que selon la direction de la contrainte horizontale majeure (N155°E), l'extension se développe préférentiellement suivant l'horizontale.

Les différentes méthodes d'excavation/soutènement testées au Laboratoire souterrain n'ont pas montré d'influence significative sur la nature et l'extension des zones fracturée connectée et discrète.

Des propriétés hydrauliques des zones endommagées spécifiques entre l'USC et l'UA

- Dans l'USC, des perméabilités de la zone endommagée peu modifiées :

La caractérisation initiale réalisée en 2005 autour de la galerie à -445 m montre des faibles perméabilités (inférieure à 10^{-11} m/s), ce qui est cohérent avec l'absence de zone fracturée connectée (continue). Ces observations ont été confirmées par les mesures effectuées dans le puits principal. La perméabilité décroît depuis la paroi de la galerie, entre 10^{-11} et 10^{-13} m/s, dans les deux premiers mètres de la roche.

- Dans l'UA, des perméabilités initiales de la zone endommagée fortement modifiées par rapport à celle des argilites non endommagées, et une capacité de cicatrisation hydraulique dans le temps :

Dans la zone fracturée connectée (ZFC), les « perméabilités équivalentes locales » initiales (i.e. peu de temps après le creusement) déterminées à partir des tests hydrauliques à l'eau réalisés au Laboratoire souterrain, varient généralement entre 10^{-5} m/s et 10^{-10} m/s avec parfois des valeurs plus basses. Des perméabilités inférieures à 10^{-12} m/s mesurées sur des échantillons prélevés entre les fractures, soulignent des volumes d'argilites peu endommagés entre ces dernières. La transmissivité de la zone fracturée connectée est attribuée aux fractures ouvertes. Au-delà de la zone fracturée connectée, dans

la zone fracturée discrète, la perméabilité initiale décroît avec la distance à la paroi : l'extension de la zone de perméabilité supérieure ou égale à 10^{-12} m/s, est estimée égale au rayon de l'ouvrage, au-delà de la zone fracturée connectée.

Les mesures hydrauliques faites autour des ouvrages dans le Laboratoire souterrain montrent une diminution progressive des perméabilités dans le temps. Celles-ci peuvent ainsi diminuer de plusieurs ordres de grandeurs et tendent vers celles des argilites saines. Ce phénomène, dit de cicatrisation hydraulique, est aussi observé sur échantillons en laboratoire, y compris pour des fractures d'ouverture millimétrique. Les analyses faites à très petite échelle au niveau des fractures montrent le rôle joué dans la cicatrisation hydraulique par les minéraux smectites contenus dans les argilites, de par leur gonflement en présence d'eau qui assure ainsi un effet de colmatage des fractures. A cela peut s'ajouter les contraintes mécaniques qui aident à la fermeture mécanique des fractures, et favorisent ainsi leur colmatage.

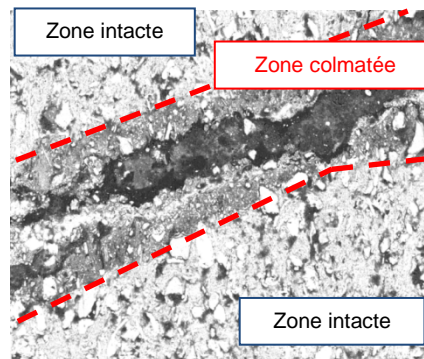


Figure 1.2-9 : Illustration du colmatage des fractures dans l'UA, à partir d'une photographie MEB (échelle millimétrique)

- Des fracturations hydrauliques et au gaz élevées :

Les données acquises, notamment en forage in situ, soulignent des fracturations hydrauliques et au gaz élevées des argilites de l'UA, respectivement d'environ 12 MPa et entre 10 et 12 MPa.

1.3 Une représentation maîtrisée des écoulements des eaux dans les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien

Le système hydrogéologique (i.e. d'écoulement des eaux) au droit du site de Meuse/Haute Marne et plus particulièrement au droit de la ZIRA est un système multicouches constitué (Figure 1.3-1) :

- d'aquifères dans les formations des calcaires du Barrois, de l'Oxfordien calcaire, du Dogger et du Trias inférieur et supérieur ;
- de formations ou niveaux semi-perméables : le Kimméridgien marneux, le Callovo-Oxfordien, les formations argileuses du Lias et les niveaux argileux et évaporitiques du Trias moyen.

Sur la zone de transposition, les écoulements dans les encaissants sus et sous-jacents immédiats du Callovo-Oxfordien (Oxfordien calcaire et Dogger) sont indépendants du fait même des caractéristiques hydrauliques et de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien.

En dehors de la zone de transposition, ce système aquifère comporte des failles hydrauliquement actives comme celles de la Marne et de Poisson (Figure 1.3-1), orientées parallèlement aux contraintes tectoniques majeures, des failles moins drainantes jouant le rôle plutôt de barrières hydrauliques comme les failles de Gondrecourt Nord et les failles de Joinville dont l'orientation NE-SO est perpendiculaire à la direction des contraintes tectoniques majeures ainsi qu'une zone de fracturation diffuse, dite zone de fracturation diffuse de Marne-Poisson, relativement active sur un plan hydraulique au Sud-Ouest de la zone de transposition.

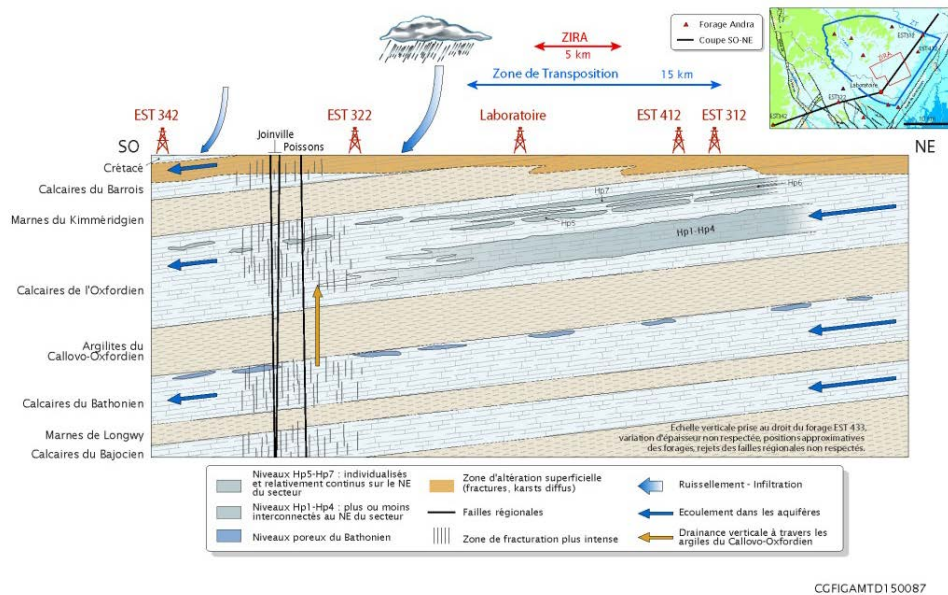


Figure 1.3-1: Représentation conceptuelle des écoulements dans les différentes formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne

1.3.1 Le système aquifère superficiel des calcaires du Barrois

Les calcaires du Barrois constituent un système aquifère karstique constitué de trois formations aquifères (calcaires sub-lithographiques, calcaires de Dommartin et calcaires cariés) séparées par des formations semi-perméables (Pierre Châline et Oolithe de Bure). Les écoulements sont organisés dans chacune des trois formations aquifères par la fracturation et un réseau de conduits karstiques de direction nord nord-ouest. Des conduits karstiques verticaux mettent en relation, localement, ces aquifères.

Au droit de la ZIRA, seuls les aquifères des calcaires sub-lithographiques et des calcaires de Dommartin inférieurs et moyens sont présents. Les calcaires de Dommartin supérieurs et les calcaires cariés sont présents seulement sur les points hauts du secteur et constituent une zone désaturée. L'aquifère des calcaires sub-lithographiques devient captif sous la Pierre Châline et les forages de la vallée de l'Ormançon et de l'Orge sont artésiens en hautes eaux.

Dans les zones plus carbonatées, la perméabilité peut être importante voire élevée lorsque les calcaires sont fracturés et karstifiés. Les tests de pompage réalisés en forages au niveau du Laboratoire souterrain indiquent une perméabilité moyenne de l'ordre de 10^{-6} m/s représentative des calcaires sub-lithographiques, seule formation recoupée par ces forages, en regard de quelques 10^{-4} m/s indiqués par la Banque du Sous-Sol du BRGM sur la base de tests de pompage menés dans les calcaires les plus karstifiés.

L'écoulement général des deux aquifères du Barrois sur la ZIRA (calcaires sub-lithographiques et des calcaires de Dommartin inférieur) est dirigé vers le Nord, en lien avec la topographie et les cours d'eau. Les vitesses d'écoulement sont de l'ordre de 10 km/an. La piézométrie simulée à l'actuel indique un gradient hydraulique de l'ordre de 0.2 % sur les plateaux alors qu'au droit des vallées il peut atteindre 1 %.

Les principaux exutoires naturels des calcaires du Barrois sont les sources situées dans la Vallée de la Saulx et de l'Ornain.

1.3.2 L'Oxfordien calcaire

L'Oxfordien calcaire est constitué (i) de calcaires qui intègrent des variations lithologiques traduites par l'occurrence d'horizons poreux (Hp) et (ii) d'une série grise argilo-marneuse.

Les horizons poreux sont caractérisés par des porosités et des perméabilités variant respectivement entre 13 % et 25 % et entre 10^{-9} m/s et 10^{-7} m/s. Verticalement, dans la partie Nord-Est de la ZT, les quatre premiers niveaux (Hp1 à Hp4) constituent la nappe dite de l'Oxfordien moyen et les trois derniers niveaux (Hp5, Hp6 et Hp7) la nappe dite de l'Oxfordien supérieur.

Dans la partie Nord-Est de la ZT, la nappe de l'Oxfordien moyen est séparée de celle de l'Oxfordien supérieur par le semi-perméable que constituent les marnes de la série grise (Figure 1.3-2).

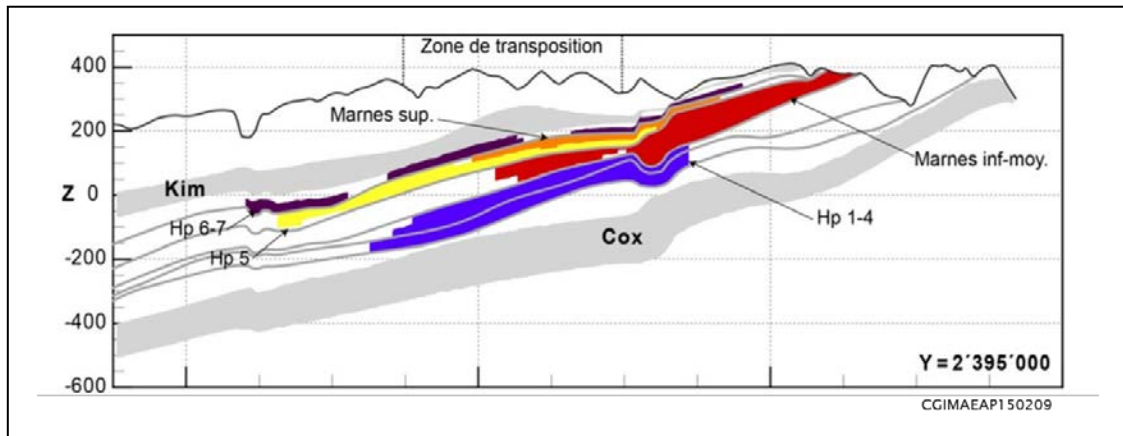


Figure 1.3-2 : Structure verticale du système aquifère de l'Oxfordien calcaire. Les couleurs correspondent aux différents niveaux poreux (violet, jaune, marron). La présence des marnes est représentée en orange et rouge

Dans la partie Sud-Ouest de la ZT, l'épaisseur négligeable ou l'absence de ce semi-perméable fait que l'ensemble des formations de l'Oxfordien calcaire y compris les horizons poreux ne forment qu'une seule nappe avec globalement un seul champ d'écoulement.

Ainsi, les transmissivités des horizons poreux sont faibles, de l'ordre de :

- 10^{-7} m²/s pour Hp1 à Hp4, de 10^{-8} m²/s pour Hp5, et de 10^{-8} m²/s à 10^{-7} m²/s pour Hp6 et Hp7 dans la zone où ils sont bien séparés par la série grise ;
- 10^{-8} m²/s à 10^{-7} m²/s là où les Hp ne constituent qu'une seule nappe aquifère.

La recharge en eau de l'Oxfordien se fait principalement par les affleurements à l'Est et au Sud-est du secteur. Les circulations d'eau sur le secteur se font préférentiellement vers le centre du bassin suivant une direction Nord-Ouest.

Les vitesses de pore de l'ordre de 1 km par 100.000 ans sont confirmées par l'analyse d'éléments chimiques radioactifs dans les eaux (¹⁴C, ³⁶Cl), à partir de la connaissance de leur teneur dans les eaux de pluie et de leur décroissance radioactive, pour un gradient de charge hydraulique horizontal globalement homogène et constant de l'ordre de 0,04 m/m.

L'alimentation de la zone de failles N150°E (failles de la Marne) se fait directement par infiltration dans les réseaux karstiques qui se sont développés sur la partie de ces failles recoupant l'Oxfordien à l'affleurement. La piézométrie et la salinité y sont différentes de celles du reste du secteur d'étude en fonction des connexions existant dans le réseau de failles. Les écoulements y ont une direction globalement SE-NO

Au droit de la ZIRA, du fait de sa faible perméabilité, de l'ordre de 10^{-12} m/s et de son extension limitée à la partie Nord-Est de la zone de transposition, la série grise structure l'aquifère de l'Oxfordien en deux nappes ayant chacune son champ d'écoulement propre :

- la nappe de l'Oxfordien supérieur présente des charges variant de 305 m à 280 m. Les écoulements sont orientés en directions Nord et du Nord-Ouest avec un gradient hydraulique moyen de 4 % ;
- la nappe de l'Oxfordien moyen présente des charges variant de 295 m à 270 m soit un gradient horizontal de 0,6 %. Les écoulements sont orientés vers le Nord-Ouest avec un même gradient de charge hydraulique moyen de l'ordre de 4 %.

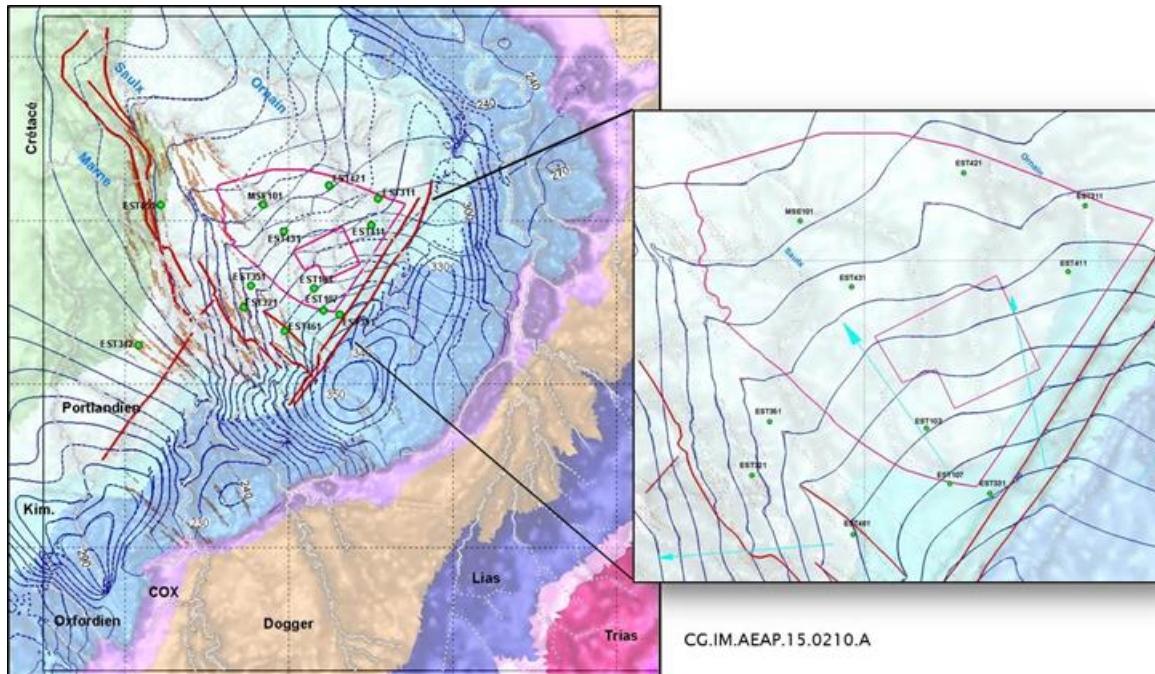


Figure 1.3-3 : Piézométries simulées des deux nappes de l'Oxfordien calcaire (nappe de l'Oxfordien supérieur à gauche) -Piézométries latérales de l'Oxfordien calcaire moyen et supérieur

1.3.3 Le Dogger

L'aquifère du Dogger, représenté par les formations du Bathonien, est caractérisé par une hétérogénéité de faciès qui se traduit par une forte variabilité locale de la transmissivité (10^{-5} m²/s à 10^{-10} m²/s) sur la Zone de Transposition.

Les venues d'eau du Dogger observées en forages sont rares et sont localisées dans les niveaux supérieurs du Bathonien. Elles sont associées, en dehors des zones fracturées, à des horizons poreux situés dans des calcaires granulaires d'environnement de barrière récifale. Les transmissivités élevées mesurées au droit d'un seul forage au centre de la zone de transposition (10^{-5} m²/s) sont caractéristiques des grainstones peu cimentés avec une macroporosité bien connectée. Ces niveaux, présents sur une vingtaine de mètres, dont la porosité est relativement faible (10 à 15 %), ont une distribution spatiale qui paraît liée à des modifications diagénétiques précoces associées à des émerSIONS jouant un rôle dans la préservation de la porosité. La distribution et l'extension de ces niveaux sont de fait difficiles à définir. De même, leur faible épaisseur est difficilement détectable en sismique.

La recharge s'effectue principalement par les affleurements à une trentaine de kilomètres à l'Est de la ZT. Il n'existe pas d'exutoire naturel de cette formation sur la ZT. La zone principale des écoulements est contrainte par la structure de la ceinture des faciès de barrière récifale, où peuvent se développer potentiellement des niveaux poreux et perméables, localisés au centre de la ZT sur un axe qui part depuis les affleurements au Sud vers le NNO. La vitesse de déplacement de l'eau est plus rapide que dans l'Oxfordien : les écoulements sont globalement orientés vers le Nord-Ouest (Figure 1.3-4), avec un gradient hydraulique moyen de 0,1 %, soit une vitesse de pore de l'ordre de 5 km par 100.000 ans dans les zones transmissives.

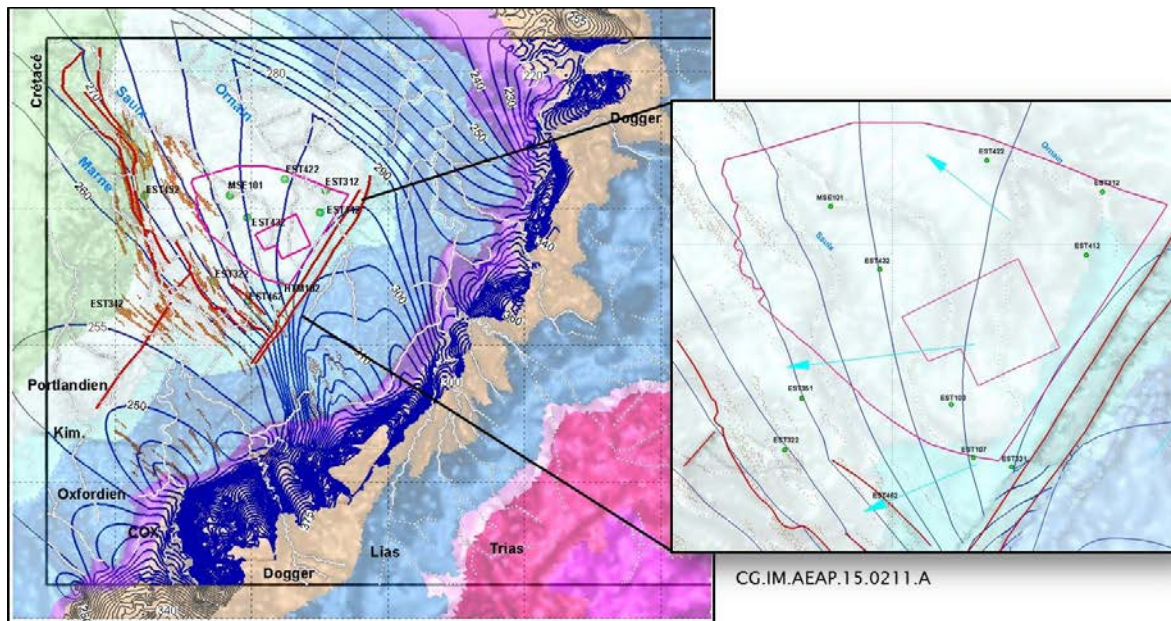


Figure 1.3-4 : Piézométries simulées dans le Dogger

1.4 Une géodynamique interne limitée et lente

Il est acquis que le site de Meuse/Haute-Marne appartient à un domaine géologique stable, caractérisé par une activité sismique extrêmement faible, comme le prouvent les enregistrements de sismicité instrumentale (écoute sismique depuis 1961 à l'échelle de la France, ciblée sur le secteur de Meuse/Haute-Marne depuis 2001) et les chroniques historiques (séismes ayant été ressentis et ayant occasionné des dégâts au cours des derniers 1000 ans). Sur le secteur de Meuse/Haute-Marne, comme dans toute la région située au Nord-Ouest de ce secteur, il n'existe aucun épicentre de séisme historique et la sismicité instrumentale est quasi nulle (Figure 1.4-1).

Les données sur les déformations actuelles ($5 \cdot 10^{-9}$ an⁻¹) et sur la sismicité durant la préhistoire confirment l'hypothèse que la plus grande partie des contraintes tectoniques est absorbée par les déformations des régions limitrophes à l'Est de la France, elles-mêmes peu déformées.

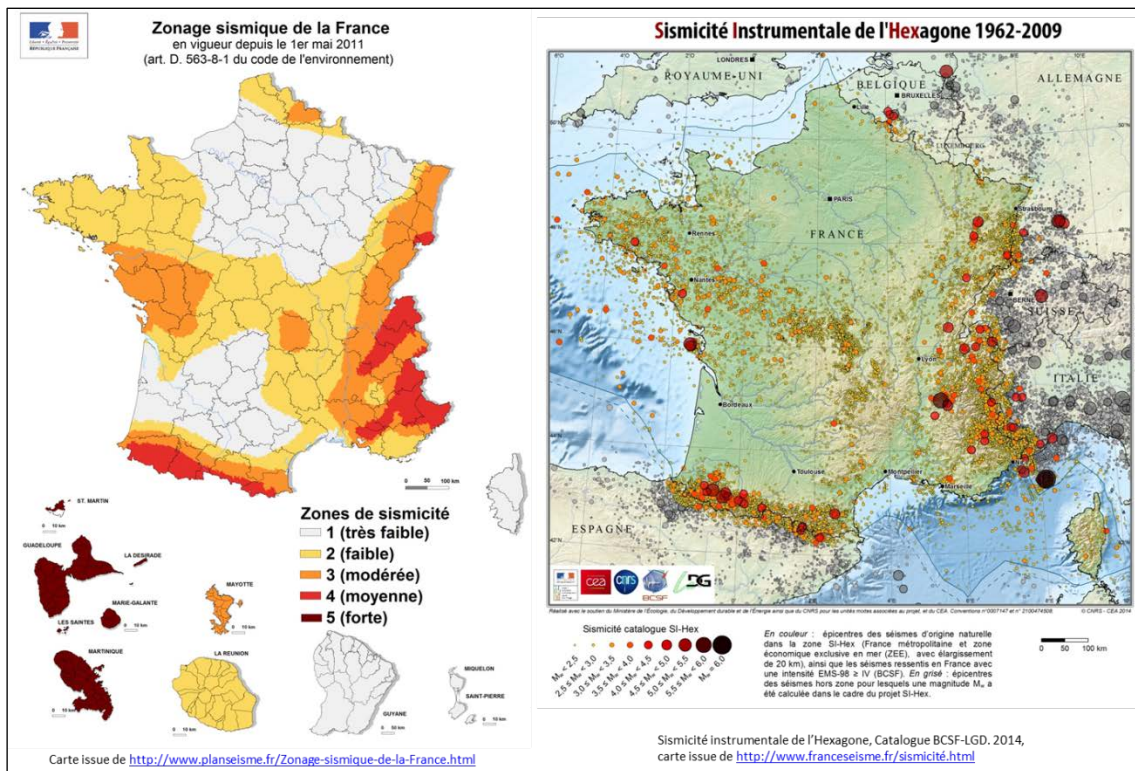


Figure 1.4-1 : Zonage sismique en France (gauche) et cartographie des séismes enregistrés entre 1962 et 2009 (droite)

La connaissance de l'activité sismique au cours des derniers 50 ans (par l'écoute sismique), étendue aux derniers siècles par les chroniques historiques, porte sur les séismes ayant un temps de retour en rapport avec ces durées. Des séismes à plus longues périodes de retour sont cependant susceptibles de se produire à proximité du site. Leur probabilité d'occurrence et leur magnitude peuvent devenir significatives pour la période post fermeture du stockage et dimensionner l'aléa sismique sur cette période.

Par ailleurs, l'incision des vallées dans les plateaux calcaires au cours des 2 derniers millions d'années, montre l'existence d'un mouvement général de surrection (60 à 80 m/millions d'années en Meuse/Haute-Marne), qui affecte l'ensemble du domaine ouest-européen et produit des déformations de très grandes longueurs d'ondes qui pourraient induire une sismicité sur les failles régionales, avec de très longues périodes de retour des séismes.

1.5 Une formation stable dans un environnement qui évolue peu sur le prochain million d'années

De manière générale, l'évolution des formations géologiques résulte de la combinaison de processus régis par l'évolution géodynamique interne avec un très lent mouvement de surrection découlant de la tectonique des plaques formant la croûte terrestre, et de l'évolution du climat caractérisée par la rapidité et l'amplitude des variations organisées en cycles de différentes durées.

Les estimations de l'évolution future sont établies à partir d'une approche déterministe en intégrant l'ensemble des processus en interaction. Compte tenu de l'état des connaissances sur le milieu naturel et de l'étendue des incertitudes de tous ordres qui interviennent pour traiter du futur et qui croissent avec les durées traitées, l'estimation de cette évolution est réalisée sous forme de scénarios, de façon à disposer des cas bornant les extrêmes possibles et à définir l'enveloppe des évolutions physiquement plausibles sur la durée considérée.

1.5.1 Une évolution géodynamique globalement limitée sur le prochain million d'années

1.5.1.1 Evolution géodynamique interne

Sur la durée du prochain million d'années, il y aura persistance du régime de déformation extrêmement lent qui caractérise le domaine dans lequel se situe le bassin de Paris, hors des zones où se font les déformations absorbant le rapprochement des plaques (notamment les Alpes). Ce domaine a été très peu déformé au cours des derniers 20 millions d'années, alors que se formaient les Alpes. Il n'est affecté que par un mouvement général de surrection du bassin de Paris caractérisé par une variabilité spatiale créant des ondulations de faible amplitude qui déforment l'ensemble de la lithosphère, de façon très lente et continue. Sur la ZT, il se produira ainsi une remontée relative de la pile sédimentaire en direction du Nord-Ouest, de l'ordre de 100 millions d'années sur une distance de 90 km, d'où une diminution progressive du pendage des formations sédimentaires en direction du Nord-Ouest.

1.5.1.2 Evolution du climat

Depuis un million d'années environ, le climat de la région se caractérise par une succession de périodes glaciaires et interglaciaires. La prévision de l'évolution du climat sur la durée du prochain million d'années dépend des hypothèses concernant les rejets de gaz à effet de serre qui seront générés par les activités humaines. Cette incertitude majeure est traitée par la prise en compte de 2 scénarios climatiques, enveloppes des évolutions possibles :

- une évolution naturelle du climat, qui se place dans le prolongement direct de l'évolution passée, établie en prenant en compte les rejets actuels de CO₂ fossile. Ce scénario prévoit la succession d'états climatiques tempéré, boréal, périglaciaire et de maximum glaciaire, organisés en cycles de 100 000 ans, sur la durée du prochain million d'années. La prise en compte du taux actuel CO₂ dans l'atmosphère conduit à prolonger la période de climat tempéré actuelle durant les prochains 50.000 ans avant la prochaine entrée en glaciation ;
- une évolution fortement perturbée, établie en fonction d'une hypothèse, estimée haute, sur les rejets de CO₂ au cours des prochains siècles (5.000 GT de carbone fossile) et sur le cycle du CO₂ atmosphérique. Ce scénario est caractérisé par une rupture de l'évolution par rapport au passé, marquée par une translation vers le pôle chaud qui ne s'amortit que très lentement, en 600.000 à 800.000 ans.

1.5.1.3 Evolution en surface sur le site

Les changements climatiques, combinés au soulèvement des terrains, déterminent 2 scénarios d'évolution géomorphologique qui modifient (i) la topographie (en conséquence des processus d'érosion et d'altération qui affectent les formations géologiques affleurant) (ii) les écoulements en surface et dans les calcaires du Barrois, et (iii) la biosphère.

Sur la base des deux scénarios climatiques retenus, deux schémas d'évolution en surface, notablement différents sont considérés :

Dans le cas de l'évolution naturelle du climat, les conditions actuelles de paysage stable perdureraient encore pendant 50.000 ans. Au-delà, l'évolution géomorphologique serait marquée par l'incision des vallées lors de chaque entrée en période glaciaire et une lente ablation des plateaux, combinées au développement périodique d'un pergélisol qui affecterait toutes les couches aux affleurements et atteindrait les calcaires de l'Oxfordien en profondeur sur le site de Meuse/Haute-Marne. De nouveaux affleurements des calcaires oxfordiens pourront apparaître en fond de vallée de l'Ornain, au Nord-Nord-Ouest de la ZIRA, où cette formation est actuellement sous couverture. Cet événement se produirait au plus tôt au-delà de 750.000 ans (si on considère un taux de surrection maximaliste) et plus probablement à une date située autour du million d'années, voire très au-delà du million d'années si on prend en compte les possibilités de captures fluviales.

Dans le cas de l'évolution climatique perturbée, au cours des premiers 500.000 ans durant lesquels le climat serait globalement chaud, le paysage du secteur de Meuse/Haute-Marne se modifierait de façon très différente de celle du scénario précédent, du fait de l'érosion affectant le plateau des calcaires du Barrois, tandis que les vallées seront le siège d'alluvionnements. Ce n'est qu'au-delà de 500 000 ans

que l'incision des vallées se ferait de nouveau sentir. En termes de bilan, cela aboutirait à un paysage aplani avec un abaissement du relief de l'ordre de 35 m au terme des prochains 500.000 ans et de 45 m dans 1 million d'années, (contre respectivement 10 m et 20 m dans le cas de l'évolution climatique naturelle) combinée au recul du relief de côte qui arriverait en limite Sud Est de la ZIRA dans 500.000 ans. Dans ce scénario, la mise à l'affleurement du toit des calcaires oxfordiens en fond de vallée de l'Ornain au nord du site se produirait largement au-delà du prochain million d'années.

1.5.2 A l'aplomb de la ZIRA, un Callovo-Oxfordien non affecté par les modifications qui se produiront en surface sur le prochain million d'années

L'ensemble des données et des simulations confirme, qu'à l'aplomb du site, la formation du Callovo-Oxfordien, protégée sous environ 500 m de couverture de calcaires et de marnes, ne sera pas atteinte par l'érosion ni par le pergélisol. Le bilan au terme du prochain million d'années se limite à une réduction de profondeur de l'ordre de 15 à 20 m à l'aplomb des zones du relief actuel (comme la zone des puits), et de l'ordre de 25 à 30 m à l'aplomb de la vallée de l'Orge et de la vallée de l'Ormançon de part et d'autre de la zone des puits. Concernant l'état des contraintes tectoniques, il n'est pas susceptible d'être modifié à l'échelle du prochain million d'années. Seuls les phénomènes d'érosion modifieront la contrainte verticale. Cependant, cette érosion reste faible (de l'ordre de 20 à 45 m) ; la modification de la contrainte verticale en résultant sera de fait négligeable.

Sur la durée du prochain million d'années, l'évolution géodynamique ne provoquera aucune modification des caractéristiques de la formation hôte. L'épaisseur et les caractéristiques pétro-physiques et chimiques du Callovo-Oxfordien ne vont pas changer, du fait notamment de l'absence d'évolution différentielle des conditions aux limites que sont les formations encaissantes, Dogger et Oxfordien carbonaté ; la diminution du pendage sera peu perceptible, et il ne se créera pas de fractures dans le Callovo-Oxfordien (ni d'origine tectonique, ni d'origine climatique). Le Callovo-Oxfordien sera seulement soumis à de très faibles fluctuations de température au rythme des cycles climatiques, notamment un refroidissement d'une dizaine de degrés par rapport à l'actuel au cours des périodes de climat froid.

L'évolution du gradient de charge vertical à travers de la formation du Callovo-Oxfordien découle de l'évolution des écoulements dans les aquifères qui l'encadrent : Oxfordien calcaire et Dogger. Les conditions aux limites de ces aquifères évoluant en même temps (cas de l'installation du pergélisol aux affleurements notamment) et, avec de faibles amplitudes, le gradient évoluera peu. Au cours du prochain million d'années, la ligne de gradient nul séparant la zone à gradient descendant (située à l'est) de la zone à gradient ascendant (située à l'ouest) devrait se déplacer un peu vers le Nord-Ouest en conséquence de la surrection tectonique régionale. L'évolution géodynamique sur 1 million d'années n'induit pas une augmentation de la pression hydrostatique du Callovo-Oxfordien par rapport à celles des encaissants.

1.5.3 Des écoulements dans les aquifères encadrant le Callovo-Oxfordien peu modifiés sur le prochain million d'années

1.5.3.1 Evolution des écoulements dans l'Oxfordien calcaire

La mise à l'affleurement de l'Oxfordien au nord de la ZT dans la vallée de l'Ornain, même si elle ne survient qu'au-delà de 750.000 ans, première date possible, du fait de l'évolution géomorphologique, n'impacterait pas significativement les directions des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté. Ces évaluations reposent sur un modèle 3D de transport convectif de particules utilisant des champs de vitesse d'écoulement transitoire induits par l'évolution géomorphologique : les panaches, de particules émises à l'aplomb du stockage respectivement à $t=0$ Ka et $t=400$ Ka, résultant de l'évolution hydraulique transitoire sur 1 million d'années, sont orientés dans la même direction que le panache du modèle à l'actuel (Figure 1.5-2).

En période de climat périglaciaire et de maximum glaciaire, le pergélisol qui s'installerait sur l'ensemble du secteur de Meuse/Haute-Marne et atteindrait l'Oxfordien carbonaté à l'aplomb de la Zone de Transposition. Par rapport à l'actuel, le champ d'écoulement serait alors caractérisé par des charges hydrauliques inférieures du fait de la quasi-fermeture des aires de recharge par le pergélisol. Il en résulterait une réduction des vitesses d'écoulement d'environ 10 à 25 % par rapport aux vitesses à l'actuel.

Du fait de l'hypothèse prise sur la surrection tectonique, plus forte en direction du nord à l'échelle de la région, à un million d'années les vitesses au droit de la zone de transposition seraient réduites de l'ordre de 8 % par rapport à l'actuel, et la ligne de partage entre les eaux s'écoulant vers la vallée de l'Ornain et vers la vallée de la Marne se déplacerait en direction du Nord-Ouest.

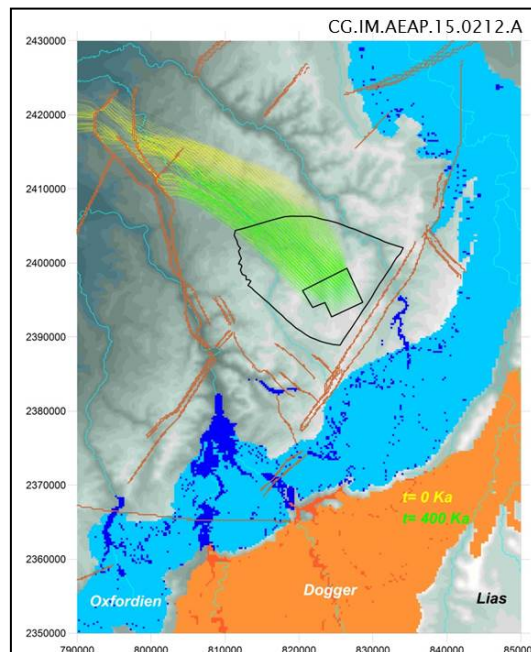


Figure 1.5-2 : Modélisation des trajets de particules émises dans l'Oxfordien carbonaté à l'aplomb de la zone d'implantation et de recherche approfondie, à $t=0$ Ka (en jaune) et à $t= 400$ Ka (en vert) donc avec prise en compte de l'évolution géodynamique sur le prochain million d'années

1.5.3.2 Evolution des écoulements dans le Dogger

Sur la ZT, le Dogger est à l'abri des perturbations se développant depuis la surface. Quel que soit le scénario climatique, sur la durée du prochain million d'années, l'évolution géodynamique externe ne provoquera aucune modification significative de ses caractéristiques.

Les directions d'écoulement au niveau de la ZT ne subiraient qu'un léger déplacement vers l'Est par rapport à l'actuel. Les vitesses d'écoulement resteraient du même ordre qu'à l'actuel, soit quelques kilomètres par 100 000 ans. Lors des périodes froides avec pergélisol, la réduction des vitesses d'écoulement serait nettement moins importante que pour l'Oxfordien carbonaté.

Les trajectoires de particules émises dans le Dogger à l'aplomb du stockage à $t = 0\text{Ka}$ et $t = 400\text{Ka}$ indiquent respectivement des exutoires naturels situés : (i) dans la vallée de la Marne/Rognon et (ii) dans les vallées de la Marne et la vallée de la Manoise. L'apparition d'un deuxième exutoire, localisé à une trentaine de kilomètres au sud de la zone d'implantation et de recherche approfondie, s'explique par l'érosion dans la vallée de la Manoise, qui entaillera les calcaires du Dogger. Au sud-ouest de la zone d'implantation et de recherche approfondie, le panache des particules émises à $t = 400\text{ Ka}$ se trouve dévié vers l'est par rapport au panache des particules relâchées à $t=0$ ans (Figure 1.5-3). Il en résulte une augmentation de la longueur médiane des trajectoires, qui passerait de 60 Km à 80 Km.

Au droit de la zone de transposition, les vitesses d'écoulement diminueraient progressivement jusqu'à 10 % par rapport aux vitesses d'écoulement à l'actuel. Au Sud-Ouest de la zone, les vitesses d'écoulement augmenteraient relativement peu, environ 30 %, par rapport à l'actuel.

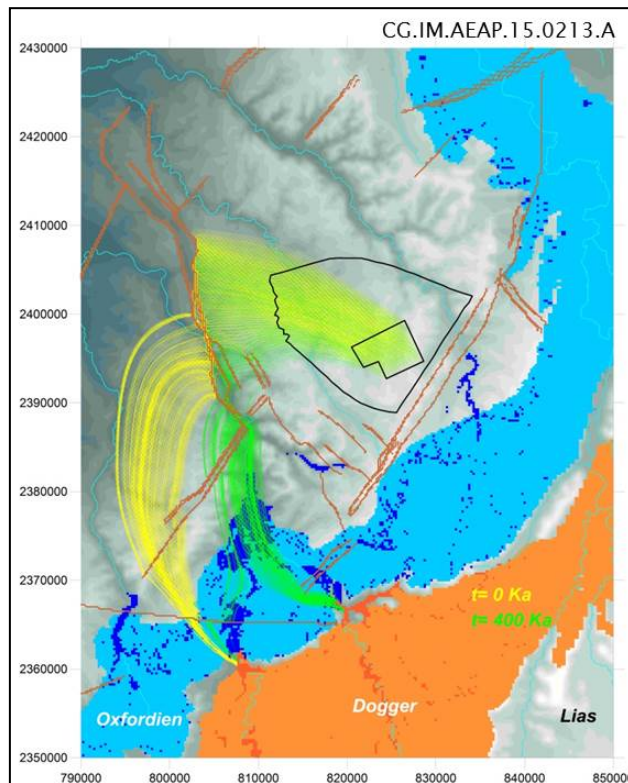


Figure 1.5-3 : Modélisation des trajets de particules émises dans le Dogger à l'aplomb de la zone d'implantation et de recherche approfondie, à $t=0\text{ Ka}$ (en jaune) et à $t= 400\text{ Ka}$ (en vert) donc avec prise en compte de l'évolution géodynamique sur le prochain million d'années

Sur le prochain million d'années, l'évolution géodynamique ne modifie pas significativement les écoulements et les transferts depuis le stockage dans les aquifères encadrant la formation du Callovo-Oxfordien, Dogger et Oxfordien carbonaté.

Même dans le cas de l'apparition la plus précoce possible (dans 750.000 ans) d'un éventuel exutoire dans l'Oxfordien carbonaté, sa localisation à plusieurs kilomètres au nord de la ZIRA et les faibles vitesses d'écoulement dans l'Oxfordien en limitent les conséquences vis-à-vis des radionucléides mobiles à vie longue qui atteindraient le toit du Callovo-Oxfordien à partir de cette période.

1.6 L'absence de stérilisation de ressources naturelles

1.6.1 Les ressources minérales et en hydrocarbures

Sur l'ensemble de la zone de transposition et de manière générale sur le secteur :

- aucune carrière active n'exploite à l'heure actuelle les calcaires du Barrois pour des besoins locaux en pierre de construction, en granulat ou autres usages d'empierrement, selon la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM. Il n'y a pas de ressource avérée ou exploitée dans le passé en matériaux alluvionnaires (sables, graviers, etc.), en raison de l'absence de plaine alluviale conséquente ;
- aucune ressource minière n'est exploitée sur l'ensemble de la couverture sédimentaire car elle ne renferme aucune substance minérale économiquement exploitable ;
- aucune ressource potentielle en charbon exploitable n'apparaît au regard des données géologiques. Cette ressource se développe à environ 40 km plus à l'Est du secteur dans les terrains du Westphalien qui n'existent pas à l'aplomb du secteur ;
- les conditions géologiques ne sont pas favorables à la présence potentielle d'hydrocarbures conventionnels. La campagne de sismique réflexion 3D menée par l'Andra en 2010 sur l'emprise de la zone d'implantation et de recherche approfondie montre l'absence de toute structure susceptible de constituer un réservoir à hydrocarbure. Les gisements d'hydrocarbures les plus proches sont ceux de Forcelles (pétrole) en Meurthe et Moselle à environ 54 kilomètres à l'Est, Sud-Est et celui des Trois-Fontaines (gaz) près de St Dizier à 39 kilomètres au Nord-Ouest. Ces deux gisements qui ne sont plus exploités, sont des gisements structuraux localisés dans les couches du Trias moyen à supérieur.
- la probabilité de ressources potentielles en hydrocarbures non-conventionnels est quasi inexistante. A l'aplomb de la zone d'implantation et de recherche approfondie, la roche mère du Westphalien n'existe pas ; sa limite occidentale est située à plus de 10 kilomètres au N et NE de la zone d'implantation et de recherche approfondie. La roche mère du Stéphaniens, présente sous la zone d'implantation et de recherche approfondie est très pauvre en roche-mère potentielle, en charbon et schistes à matière organique.

1.6.2 Les ressources géothermales

Les données acquises par l'Andra sur le secteur, plus particulièrement avec le forage EST433 foré jusqu'à environ 2000 m de profondeur et dont un des objectifs scientifiques était d'évaluer les caractéristiques géothermales locales, ont montré que ces dernières (gradient géothermal et caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère supérieur des grès du Buntsandstein du Trias) étaient communes et ne présentaient pas de caractère exceptionnel par rapport à ce que l'on peut trouver ailleurs dans le bassin de Paris.

Ainsi, le gradient géothermal est d'environ 3°C/100 m, ce qui se situe dans la moyenne nationale. L'eau de l'aquifère des grès du Buntsandstein (environ entre 1860 et 1890 m de profondeur) a une température de 66 °C avec une très forte salinité de 180 g/l.

1.6.3 Les ressources en eaux

Aujourd'hui sur le secteur d'étude, seuls les calcaires du Barrois correspondant à la formation aquifère de surface affleurant sur le secteur de la ZIRA constituent une ressource en eau exploitable. Ils forment un aquifère karstique caractérisé par des circulations rapides reflétant des réactions rapides d'infiltration des eaux de précipitation et des parcours souterrains et probablement également rapides. Cette capacité d'écoulement rapide diminue fortement la capacité d'emmagasinement en eau de cet aquifère. Les ressources en eau exploitées provenant des calcaires du Barrois sont essentiellement localisées le long des cours d'eau de l'Orge, de la Saulx et de l'Ornain.

Les aquifères captifs et profonds de l'Oxfordien et du Dogger, de par la salinité de leur eau et les faibles débits qui les caractérisent, ne sont pas exploités sur le secteur.

1.7 D'autres caractéristiques du site intervenant dans l'évaluation de sûreté

1.7.1 Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien

1.7.1.1 Les calcaires du Barrois et les Marnes du Kimméridgien

Les calcaires du Barrois (formation du Jurassique supérieur) se trouvent à l'affleurement sur la plus grande partie du secteur du site de Meuse/Haute-Marne. Leur épaisseur, variable en fonction du pendage et de la topographie, augmente vers le Nord-Nord-Ouest. La formation, constituée de cinq niveaux lithologiques carbonatés distincts, peut avoir, lorsqu'elle est complète, une épaisseur totale maximale de l'ordre de 150 m.

Les marnes du Kimméridgien affleurent le long de la bordure Est de la ZT et au Sud-Est de la ZIRA où leur épaisseur totale est de 110 m environ. La formation des Calcaires du Barrois et des marnes du Kimméridgien constituent six unités litho stratigraphiques qui sont, depuis la base vers le sommet :

- la formation des marnes du Kimméridgien : elle est caractérisée par la superposition très régulière de trois niveaux argilo-marneux (« marnes à Exogyres ») de quelques dizaines de mètres d'épaisseur chacun, séparés par deux bancs de « calcaires blancs » de 10 à 15 mètres de puissance. Quelques niveaux calcaires d'épaisseur métrique sont intercalés au sein des argiles et des marnes. D'un point de vue minéralogique, des analyses sur l'ensemble de la série montrent que la fraction argileuse de la série est essentiellement composée d'Illite (50 à 65 %), de chlorite (5 à 10 %), de kaolinite (10 à 25 %) et d'interstratifiés I/S R=1 (5 à 15 %) et que ces fractions varient peu verticalement malgré les changements de lithologie ;
- les calcaires sub-lithographiques du Kimméridgien supérieur : épais de 20-25 m environ, ils sont constitués de calcaires micritiques homogènes à inter bancs marneux fins et de rares niveaux bioclastiques peu épais ;
- la Pierre Châline du kimméridgien supérieur : épaisse d'environ 10-15 m : elle est formée d'une alternance de niveaux coquilliers, de calcaires à foraminifères et débris de coquilles, de calcaires micritiques et de marnes. De par sa nature, elle peut être imperméable ou semi-perméable ;
- les calcaires de Dommartin du Tithonien inférieur : d'une épaisseur de 60 à 65 m, ils sont constitués de calcaires argileux, dolomitiques et bioclastiques se terminant par des calcaires sub-lithographiques caverneux (« calcaires de Dommartin supérieurs »). Des intercalations marneuses pluri centimétriques limitent les trois sous-ensembles (inférieurs, médians, supérieurs) ;
- l'Oolithe de Bure : épaisse d'environ 2 mètres : elle est constituée d'un calcaire oolithique cimenté ;
- les calcaires cariés, les calcaires tachetés et les calcaires tubuleux sur une épaisseur d'environ 35 m, datés du Tithonien inférieur : ces unités présentent une très faible variabilité spatiale de composition et d'épaisseur. La série décrite à l'échelle du secteur est applicable à la fois pour la description et l'épaisseur des unités à l'échelle de la zone d'implantation et de recherche approfondie, à l'exception de la partie sommitale (derniers mètres) des calcaires tachetés et des calcaires tubuleux.

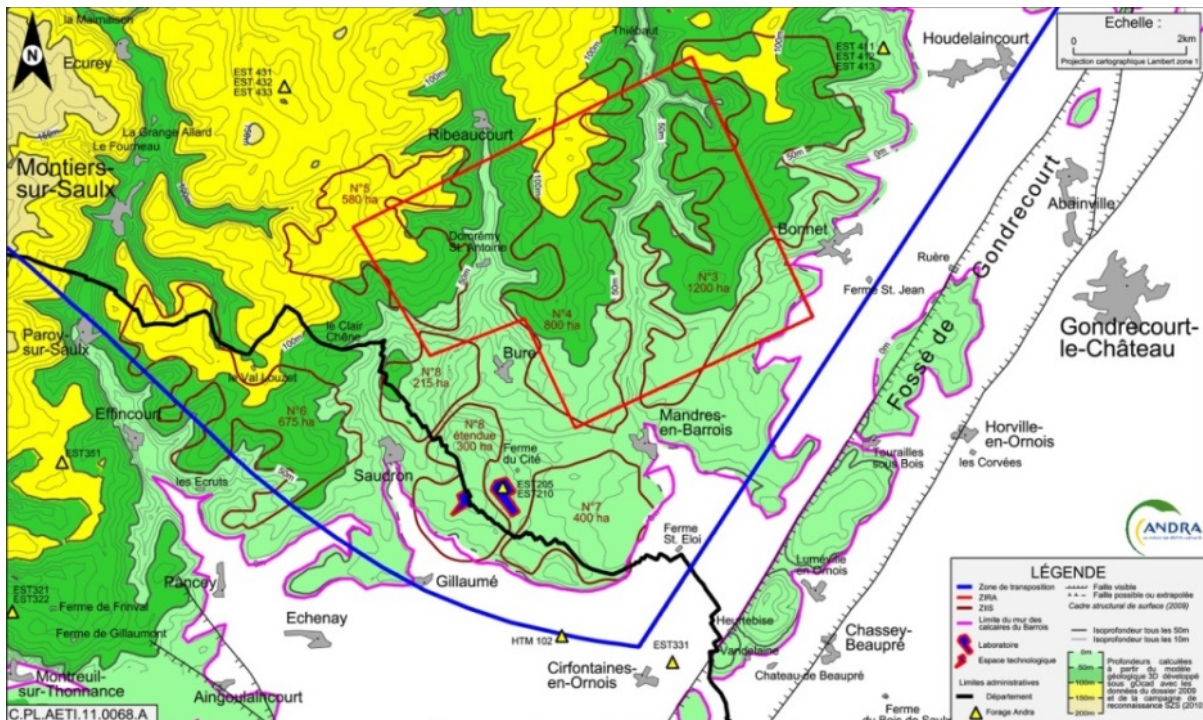


Figure 1.7-1 : Carte de l'épaisseur (m) des calcaires du Barrois et des formations plus récentes (sur la zone d'implantation et de recherche approfondie, cette épaisseur correspond à l'épaisseur des calcaires du Barrois)

A l'exception de l'oolithe de Savonnières, la fracturation liée aux effets climatiques affecte l'ensemble des faciès à l'affleurement (calcaires du Barrois et marnes du Kimméridgien) et est intense en surface sur des épaisseurs de 20 à 30 mètres. Elle permet l'infiltration des eaux météoriques. Il en résulte des films et amas d'argiles de décalcification entre les blocs calcaires, dont la dimension décroît et la densité diminue vers la surface, aboutissant aux sols argileux à blocs caillouteux en surface. S'y ajoutent des conduits et puits karstiques, évidés ou comblés par les argiles de décalcification, qui sont d'ouverture métrique dans les unités supérieures des calcaires du Barrois, rares et de faibles dimensions, dans les unités calcaires présentes sur la zone d'implantation et de recherche approfondie.

Dans les unités marneuses proprement dites, la teneur en eau est de l'ordre de 14 %. La porosité peut atteindre 30 % et la teneur de la fraction argileuse est de 60 %.

1.7.1.2 L'Oxfordien carbonaté

L'Oxfordien carbonaté correspond au développement d'une plateforme carbonatée unique, qui s'étend de l'Oxfordien moyen au Kimméridgien inférieur. La puissance de cette formation augmente faiblement d'Est en Ouest sur la zone de transposition (de 275 à 335 m). Au niveau de la ZIRA, cette formation a une épaisseur moyenne de 280 mètres.

Les calcaires de l'Oxfordien se caractérisent par des variations de faciès importantes tant verticalement que latéralement. La transition entre le Callovo-Oxfordien et la plateforme carbonatée est progressive et s'exprime par des faciès argilo-marneux légèrement bioclastiques (contenant des éléments fossiles) sur une vingtaine de mètres (faciès C3a). Cette formation appelée localement « Marnes à coraux de Foug » possède des caractéristiques très proches du sommet du Callovo-Oxfordien.

De l'extension et de la continuité des différents faciès découlent la distribution et l'extension de niveaux ou horizons poreux (Hp) identifiés comme ayant les perméabilités et les porosités les plus élevées dans cette formation (perméabilités supérieures à 10^{-8} m/s).

Les différentes données directes et indirectes collectées montrent que les caractéristiques de l'Oxfordien calcaire au niveau de la ZIRA sont globalement équivalentes à celles déterminées au Laboratoire souterrain. Elles peuvent se résumer ainsi :

- les 20 premiers mètres de l'Oxfordien calcaire sont constitués d'une alternance de marnes, de calcaires argileux aux caractéristiques très proches de celles de l'unité silto-carbonatée du Callovo-Oxfordien précédente. Une vingtaine de mètres de calcaires récifaux de faible perméabilité (10^{-11} m/s à 10^{-12} m/s) vient au-dessus ;
- l'unité sus-jacente, d'une centaine de mètres d'épaisseur, regroupe des faciès fins de lagon poreux et perméables (10^{-8} m/s à 10^{-7} m/s) et des calcaires cimentés très peu poreux et de faible perméabilité. A l'aplomb du laboratoire, ces faciès de lagon s'organisent en quatre niveaux poreux discontinus (Hp1 à Hp4) qui atteignent une épaisseur cumulée de près de 80 mètres. La faible connectivité de ces niveaux expliquerait leur faible productivité. D'après les forages et les affleurements, ces faciès de lagon sont présents dans toute la partie Est et Nord-Est de la zone de transposition ;
- les 100 mètres suivants montrent une succession de bancs d'une série marneuse intercalés entre des niveaux de calcaires oolithiques. Au sommet de chacun de ces niveaux calcaires correspond un niveau plus poreux et perméable. Au total, trois niveaux aquifères (Hp5 à Hp7) d'épaisseur comprise entre 5 et 10 mètres et de perméabilité moyenne autour de 10^{-7} m/s ont été reconnus. Au niveau du Laboratoire, les perturbations provoquées par le drainage des puits montrent que les ensembles Hp1 à Hp4, Hp5 et Hp6 à 7 sont hydrauliquement indépendants. Dans la partie Est et Nord-Est, la série marneuse s'exprime en bancs de plus en plus épais et crée une séparation nette entre les niveaux aquifères inférieurs (Hp1 à Hp4) et supérieurs (Hp 5 à Hp7) de l'Oxfordien. La continuité de la série grise entre l'Est et le Laboratoire étant assurée, les transferts possibles entre les horizons poreux inférieurs et supérieurs et entre chaque horizon Hp5 à Hp7 devraient être limités sur la ZIRA. Dans la partie Sud-Ouest de la ZT, l'épaisseur négligeable ou l'absence de ce semi-perméable fait que l'ensemble des formations de l'Oxfordien calcaire y compris les horizons poreux ne forme qu'une seule nappe avec globalement un seul champ d'écoulement ;
- les derniers 30 mètres sont constitués de calcaires peu poreux et de faibles perméabilités.
 - ✓ Dans tous les niveaux poreux aquifères de l'Oxfordien, les transferts sont à la fois convectifs (horizontaux) et diffusifs. L'état thermique actuel de l'Oxfordien carbonaté est considéré à l'équilibre. Le gradient de température initial à travers cette formation est d'environ $2,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Le transfert thermique se fait par conduction. La conductivité thermique perpendiculaire pour l'Oxfordien carbonaté est estimé à $2,2\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$.

1.7.1.3 Le Dogger

La formation du Dogger est l'encaissant situé sous le Callovo-Oxfordien à une profondeur évoluant sur la zone d'implantation et de recherche approfondie entre 510 m et 680 m. La formation comprend deux ensembles carbonatés (Bajocien inférieur à moyen et Bajocien terminal à Callovien inférieur) séparés par un intervalle plus marneux (marnes de Longwy). Une diagénèse à l'origine d'une importante recristallisation des carbonates affecte l'ensemble de la série. Cette configuration se retrouve sur tout l'Est du bassin de Paris.

L'épaisseur du Dogger augmente d'Est en Ouest de 210 à 280 m sur la zone de transposition, et de 206 à 230 m sur la zone d'implantation et de recherche approfondie. Dans le détail :

- le Bajocien inférieur à moyen est constitué de faciès de plate-forme corallienne de grande extension géographique avec une variabilité très importante interdisant toute prédiction lithologique détaillée. L'épaisseur de cet intervalle est de 60 m environ. L'interprétation des données sismiques 3D de 1999 et de 2010 a mis en évidence des linéaments de direction N120, dans la plateforme carbonatée du Bajocien. Ces structures ont été reconnues grâce au forage EST210 et identifiées comme des ensembles récifaux ;
- les marnes de Longwy, montrent des faciès assez constants (alternance de marnes silteuses et de calcaires bioclastiques plus ou moins argileux et gréseux) caractérisant un environnement de rampe externe. Leur épaisseur décroît de l'Ouest (plus de 50 m au niveau de Joinville) vers l'Est (35 m sur le forage MSE101, 26 m sur HTM102 et 13 m au niveau de Commercy) ;

- l'ensemble calcaire du Bajocien terminal à Callovien inférieur (appelé par commodité Bathonien) est composé de faciès carbonatés très variables tant verticalement que latéralement (débris coquilliers, sables calcaires, récifs, faciès dolomitiques...) induisant une variabilité de la perméabilité (de 10^{-5} à 10^{-10} m/s) mesurée dans les forages de la zone de transposition. Cet ensemble d'épaisseur relativement constante sur le secteur (155 à 167 m), est surmonté par la Dalle nacrée correspondant à un faciès condensé constitué de calcaires oolithiques et bioclastiques, parfois marneux, située directement à la base des argilites à une profondeur évoluant entre 500 m et 675 m.

Les rares venues d'eau du Dogger observées en forages sont localisées dans les niveaux supérieurs du Bathonien. Elles sont associées, en dehors des zones fracturées, à des horizons poreux situés dans des calcaires granulaires d'environnement de barrière. Les transmissivités élevées (10^{-5} m²/s) mesurées au droit d'un seul forage au centre de la zone de transposition sont caractéristiques des grainstones peu cimentés avec une macroporosité bien connectée. Ces niveaux présents sur une vingtaine de mètres, dont la porosité est relativement faible (10 à 15 %), ont une distribution spatiale qui paraît liée à des modifications diagénétiques précoces associées à des émerSIONS jouant un rôle dans la préservation de la porosité. La distribution et l'extension de ces niveaux sont de fait quasiment impossibles à définir. Leur faible épaisseur est difficilement détectable en sismique.

1.7.2 La quantification de l'aléa sismique

Les incertitudes sur l'activité sismique possible pendant la très longue durée de la période après-fermeture du stockage sont prises en compte en considérant le spectre de séisme maximum physiquement possible (SMPP) en fonction de la dimension des failles (sources potentielles de séismes) (22).

Dans la démarche sécuritaire qui prévaut dans l'estimation de l'aléa sismique, et dans une démarche déterministe en accord avec la réglementation en vigueur pour estimer l'aléa sismique sur le long terme, il est considéré que toutes les failles pourraient être actives et seraient en train d'accumuler les contraintes jusqu'à production des séismes maximaux physiquement possibles (SMPP) dimensionnés par la dimension de ces failles.

Le spectre de niveau SMPP calculé pour le site du Laboratoire souterrain est pris comme référence. Ce choix permet de disposer d'un seul spectre, enveloppe des mouvements possibles sur la ZIRA et les ZIIS. Ces mouvements sont sensiblement différents selon les lieux considérés sur la ZIRA, en fonction de la distance aux failles encadrant le secteur, sources proches potentielles de séismes forts (magnitudes de $6,1 \pm 0,4$ sur les failles du système de la Marne, et de $5,2 \pm 0,2$ sur les failles des fossés de Joinville et de Gondrecourt) dimensionnant les mouvements de hautes fréquences. Le spectre horizontal est présenté sur la Figure 1.7-2.

Le spectre de la composante verticale est obtenu en multipliant les accélérations du spectre de la composante horizontale par un coefficient 2/3. A titre indicatif, ce spectre de niveau SMPP est proche de celui obtenu par approche probabiliste pour un temps de retour de l'ordre de 100 000 ans.

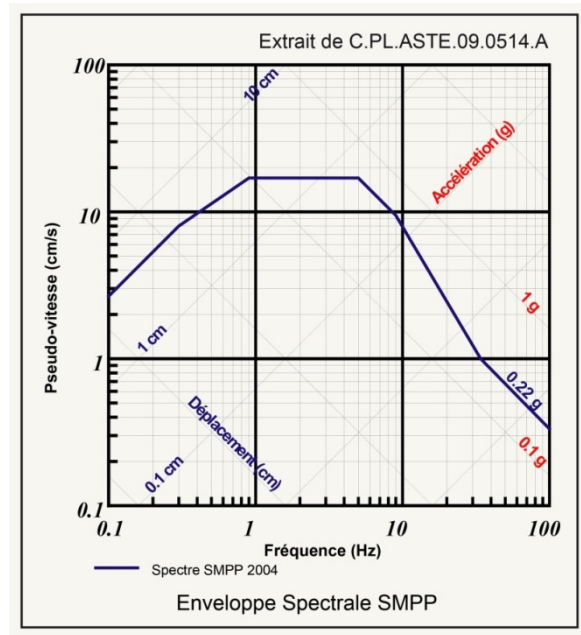


Figure 1.7-2 : Spectre SMPP - accélération (composante horizontale)

1.7.3 L'évolution des biosphères

La connaissance de l'évolution des biosphères dans le temps permet d'identifier les biosphères types à retenir lors de l'évaluation de l'impact d'un éventuel transfert des substances radioactives jusqu'à un exutoire conformément à la démarche biosphère présentée en volume I.

Ainsi, l'évolution des écosystèmes (migrations des populations végétales et animales) est liée à l'évolution du climat et des environnements physiques en surface sur le site (géomorphologie, sols, hydrologie, etc.) ainsi qu'à l'adaptation du milieu à ces conditions. Cette évolution est schématisée sous forme d'une succession de biosphères types pour chacun des scénarii d'évolution climatique (naturelle ou perturbée).

Lorsque les conditions climatiques se refroidissent et deviennent plus arides, les vallées deviennent inhospitalières et seuls les plateaux peuvent encore accueillir infrastructures et cultures. En même temps, la productivité végétale et les ressources en eau en surface décroissent, tandis que l'extraction des eaux du sous-sol est rendue plus difficile par la présence d'un pergélisol.

Dans le cas d'un réchauffement climatique, l'espace exploitable par l'homme se rétrécit également : les vallées deviennent peu hospitalières, sujettes à fortes crues ; les zones hautes des plateaux, soumises à la sécheresse et dépourvues de sols arables par l'érosion, ne se prêtent qu'à un élevage extensif. Une agriculture, de type méditerranéenne, à faible productivité, ne se conçoit guère que dans les zones d'affleurements marneux (versants et dépression d'avant côte) et dépressions karstiques où s'accumulent les sols érodés alentour.

L'analyse de ces enchainements de biosphères types amène à envisager quatre biosphères de référence en fonction des modes possibles d'exploitation de ce milieu par une population humaine :

- **Biosphère tempérée** : exploitation agricole intensive et variée avec possibilité de chasse, pêche et cueillette de loisir ; les ressources en eau ne sont pas limitées ; l'eau est extraite de puits si nécessaire ;
- **Biosphère boréale** : exploitation agricole moins intensive, essentiellement restreinte aux cultures céréalières, élevage bovin et ovin et herbage, ou pasteurs semi nomades. Les communautés humaines doivent transférer leurs activités sur les plateaux, les fonds de vallées devenant inhospitaliers. L'extraction d'eau par puits est toujours possible si la biosphère boréale fait suite à une biosphère tempérée mais pas forcément si elle fait suite à une biosphère tundra (reliquats de pergélisol possibles) ;

- Biosphère tundra : exploitation agricole limitée à l'élevage en stabulation voire au pâturage extensif, ou pasteurs semi-nomades ; l'eau de surface est disponible seulement en été mais l'eau du sous-sol n'est accessible que si des discontinuités locales du pergélisol existent et permettent des points de sortie d'eau en fond de vallées ; la faune s'adapte et migre, ce qui restreint les ressources en nourriture pour les pasteurs, eux même obligés au nomadisme ;
- Biosphère subtropicale (applicable pour les états climatiques Cr et Cs) : exploitation agricole à la fois variée, spécialisée et géographiquement limitée, de type maraichère, viticole et fruitière, et élevages extensifs exploitant le milieu naturel des zones de plateaux.

Les scénarios climatiques déterminent les périodes de temps (dates, durées) pendant lesquelles chacune de ces biosphères sont possibles :

- dans le cas du scénario d'évolution naturelle du climat, la biosphère de la région Meuse/Haute-Marne devrait rester dans un état proche de l'état observé actuellement pendant les 50 000 ans à venir. Au-delà, la biosphère tempérée est envisageable tout au long du million d'années, en épisodes plus ou moins brefs alternant avec les autres états de biosphère selon le scénario climatique. Dans le cas du scénario d'évolution climatique naturelle, elle devrait perdurer pendant les prochains 50 000 ans.
- la biosphère boréale est envisageable au plus tôt à partir de 50 000 ans dans le cas de l'évolution naturelle du climat, et devient possible dans tous les cas à partir de 280 000 ans environ.
- la biosphère tundra est envisageable à partir de 100 000 ans, dans le cas d'une évolution naturelle du climat et devient possible dans tous les cas au-delà de 500 000 ans, en alternance avec la biosphère tempérée et la biosphère boréale. Pour le scénario d'évolution naturelle du climat une très longue période à dominante tundra devrait dominer durant 150 000 ans dans environ 400 000 ans.

De nombreuses oscillations entre biosphères tempérée/boréale/tundra, avec une nette prédominance (en durée) des biosphères froides s'enchaîneront tout au long du prochain million d'années, à partir de 50 000 ans dans le cas d'une évolution climatique naturelle. Il en serait de même dans le cas de l'évolution climatique perturbée, mais beaucoup plus tardivement : au-delà de 500 000 ans.

La biosphère chaude, subtropicale, ne s'applique que dans le cas du scénario d'évolution climatique perturbée. Elle pourrait exister de façon quasi continue pendant les prochains 160 000 ans, puis de façon épisodique (en alternance avec la biosphère tempérée et de brefs épisodes de biosphère boréale) jusque vers 500 000 ans.

2

Les colis de déchets HA et MA-VL stockés

2.1	<i>La provenance et la nature des familles de déchets</i>	116
2.2	<i>L'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture</i>	118
2.3	<i>Les caractéristiques des colis primaires de déchets intervenant dans les fonctions de sûreté de Cigéo</i>	126
2.4	<i>Les conteneurs de stockage HA</i>	134
2.5	<i>Les conteneurs de stockage MA-VL</i>	139

Les colis de stockage de déchets sont constitués des « colis primaires » fabriqués par les producteurs complétés autant que de besoin par un « conteneur de stockage ». Ce chapitre présente les caractéristiques des colis primaires intervenant sur la sûreté après fermeture de Cigéo, ainsi que les conteneurs de stockage étudiés pour les déchets HA et MA-VL.

2.1 La provenance et la nature des familles de déchets

2.1.1 Provenance

Dès le début des recherches sur le stockage en couche géologique profonde des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, l'Andra et les producteurs de déchets ont convenu d'établir une référence unique pour identifier les familles de colis.

Par définition, une famille de colis représente un ensemble de colis présentant des caractéristiques (notamment procédé de fabrication, contenu chimique et radiologique, puissance thermique, niveau d'irradiation) similaires, au regard des utilisations qui sont faites de ces caractéristiques. Les familles utilisées dans le cadre du projet Cigéo sont ainsi plus nombreuses et plus détaillées que celles utilisées dans le cadre de l'Inventaire national, car le niveau de précision requis n'est pas le même pour ces deux exercices. Chaque famille de colis utilisée dans le cadre du projet Cigéo appartient dans sa totalité à une même famille de l'Inventaire national.

Les principales sources de production des déchets sont les suivantes.

- les réacteurs nucléaires de production d'électricité de générations successives :
 - ✓ la première génération correspond à 9 réacteurs de la filière « Uranium Naturel-Graphite-Gaz (UNGG) » répartis sur le site du CEA de Marcoule et sur les sites EDF de Chinon, Bugey et Saint-Laurent et aujourd'hui arrêtés ;
 - ✓ la deuxième génération correspond à la filière des réacteurs à eau pressurisée (REP) actuellement en cours d'exploitation. Elle est constituée de 58 réacteurs en fonctionnement répartis sur 19 sites ainsi que du réacteur en démantèlement Chooz A, premier réacteur de la filière REP ;
 - ✓ la troisième génération correspond au réacteur EPR (European Pressurized water Reactor) en cours de construction sur le site de Flamanville appartenant également à la filière des réacteurs à eau pressurisée.
- Il s'y ajoute des réacteurs prototypes aujourd'hui arrêtés : réacteur à eau lourde de Brénilis (EL4), réacteurs à neutrons rapides (RNR) Phénix et Superphénix.
 - ✓ Les usines du cycle du combustible

L'enrichissement de l'uranium, la fabrication du combustible nucléaire, ainsi que le traitement de celui-ci à l'issue de son utilisation dans les réacteurs, s'effectuent dans différentes installations exploitées par le groupe AREVA. Le traitement consiste à séparer les matières valorisables, uranium et plutonium, des déchets, composés d'une part des produits de fission et des actinides mineurs (américium, curium, neptunium) contenus dans les pastilles de combustible et d'autre part des éléments de structure constituant l'ossature métallique des assemblages combustibles.

- ✓ Les installations du CEA

Pour conduire ses recherches, notamment en soutien au programme électronucléaire français, sur la conception de systèmes nucléaires de nouvelle génération ou encore sur la gestion des déchets radioactifs, le CEA s'appuie sur de nombreuses installations (réacteurs expérimentaux tels que le prototype de réacteur à neutrons rapides Rapsodie ou les réacteurs Orphée et Osiris, laboratoires d'études sur les combustibles ou l'aval du cycle, notamment l'installation Atalante...) situées principalement sur les sites de Cadarache, Saclay et Marcoule. Ces sites disposent aussi d'installations support (entrepôts de déchets, installations de traitement de déchets et d'effluents). Certaines de ces installations sont aujourd'hui arrêtées et en cours d'assainissement-démantèlement.

- ✓ Les nouvelles installations ayant obtenu leur décret d'autorisation de création

En plus de l'EPR de Flamanville, l'inventaire de Cigéo prend en compte le réacteur expérimental Jules Horowitz (RJH), le Réacteur d'essais (RES) et l'installation ITER de Cadarache.

2.1.2 Hypothèses retenues pour l'inventaire des déchets

Pour établir un inventaire qualitatif et quantitatif pour Cigéo, le scénario industriel d'exploitation des installations nucléaires retenu dans le programme industriel de gestion des déchets (PIGD) établi conjointement par AREVA, le CEA et EDF en liaison avec l'Andra est le suivant :

- en ce qui concerne le parc électronucléaire, ce scénario suppose la poursuite de la production électronucléaire avec traitement de tous les combustibles usés des REP et RNR électrogènes (Phénix, Superphénix). La durée de fonctionnement prise conventionnellement en référence pour tous les réacteurs, y compris le réacteur EPR de Flamanville, est de 50 ans. Cette durée de 50 ans est à voir comme une moyenne indicative, une durée de fonctionnement moindre de certains réacteurs pouvant en effet compenser, du point de vue des déchets produits, une durée de fonctionnement supérieure pour d'autres ;
- ce scénario ne préjuge pas des résultats du réexamen décennal de sûreté des réacteurs REP, ni des modalités liées, le cas échéant, à l'allongement de la durée de fonctionnement de ces réacteurs au-delà des 50 ans pris en référence ou au renouvellement éventuel du parc par un déploiement de réacteurs de troisième génération (EPR) ou par des réacteurs de quatrième génération. Il considère que les matières (uranium et plutonium) non valorisées dans les 58 réacteurs REP actuels et l'EPR de Flamanville pourront l'être dans des installations futures. Les déchets produits par un éventuel futur parc de réacteurs ne sont pas pris en compte ;
- en ce qui concerne les installations nucléaires liées aux activités de traitement du combustible (usines AREVA), le scénario retenu considère que, par convention, elles adaptent leur durée de fonctionnement à celle du parc électronucléaire. Pour les installations de recherche (réacteurs et laboratoires CEA), actuellement en fonctionnement, leur durée de fonctionnement est supposée être de 50 ans. La durée de fonctionnement du réacteur Jules Horowitz est supposée être de 50 ans, celle de l'installation ITER de 20 ans.

2.1.3 Familles de colis de déchets MA-VL et HA

Une particularité actuelle des colis de déchets destinés à Cigéo est la coexistence de quatre niveaux d'avancement de la production de déchets et de la production des colis, qui pourra perdurer au-delà de la demande d'autorisation de création :

- des familles regroupant des colis de déchets dont la production est terminée¹⁸, pour lesquelles la définition du concept de stockage doit s'adapter ;
- des familles regroupant des colis de déchets en cours de production, pour lesquelles le conditionnement des déchets est défini et une spécification de production des colis existe ;
- des familles regroupant des colis de déchets non encore produits à ce jour dont la définition du conditionnement des déchets est déjà bien avancée ;
- des familles regroupant des colis de déchets non encore produits à ce jour dont le conditionnement est encore à l'état de recherche.

Toutes les familles de déchets destinées à Cigéo appartenant à ces quatre catégories sont répertoriées.

La conception de Cigéo s'appuie en particulier sur la connaissance des colis primaires fournie par les producteurs au regard des fonctions de sûreté à assurer dans les différentes situations de fonctionnement de Cigéo mais aussi au regard des risques et incertitudes en phase après fermeture.

L'avant-projet sommaire de Cigéo et les études de sûreté après fermeture considèrent comme donnée d'entrée les inventaires en nombre de colis du PIGD à l'indice en vigueur, à savoir l'indice D.

¹⁸ Certaines familles font l'objet d'une spécification de production.

L'inventaire de certaines familles fera l'objet d'une évolution dans une version ultérieure ; les inventaires de certains déchets spécifiques¹⁹ sont d'ores et déjà pris en compte. Les enseignements des scénarios et les options de sûreté retenues ne seront donc pas influencés par une évolution du PIGD.

Le nombre de familles de colis de déchets MA-VL est de 79. Il s'agit principalement de déchets de structure issus du traitement des combustibles usés (35 % des colis de déchets MA-VL), de déchets résultant du traitement des effluents liquides des installations nucléaires (35 % des colis de déchets MA-VL) et de déchets technologiques activés (5 % des colis de déchets MA-VL) ou contaminés (23 % des colis de déchets MA-VL) issus de l'exploitation ou du démantèlement des installations nucléaires.

Le nombre de familles de colis de déchets HA est de 19. Les déchets HA sont principalement des déchets vitrifiés (99,5% des colis de déchets HA).

Les connaissances relatives aux colis de déchets destinés à Cigéo sont transmises par les producteurs à l'Andra qui les intègre dans son socle de connaissances. Les options de sûreté prennent en compte les incertitudes sur la connaissance des familles de colis.

De même, les quantitatifs de certains déchets spécifiques (colis de déchets vitrifiés non conformes, CSD-RU...) sont d'ores et déjà pris en compte.

Le détail des familles de colis MA-VL et HA et les tableaux correspondant présentés en annexes 1 et 2 synthétisent la diversité des familles de colis MA-VL et HA retenues pour Cigéo.

2.2 L'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture

L'inventaire radiologique constitue une donnée indispensable à l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture présentée au volume III²⁰. Après distribution des différentes familles de colis de déchets dans l'architecture de l'installation souterraine, et en combinaison avec les modèles de relâchement applicables (voir *infra*), il détermine les termes sources qui sont utilisés pour les évaluations quantitatives de sûreté, dont notamment l'évaluation de l'impact radiologique de Cigéo à long terme.

L'inventaire radiologique est établi sur la base des deux principes suivants :

- l'ensemble des familles de colis de déchets du PIGD, y compris celles pour lesquelles le conditionnement est encore à l'état de recherche, est pris en compte ;
- sa construction tient compte de l'ensemble des informations disponibles auprès des producteurs, traduites sous la forme d'un « niveau de connaissance » attribué à chaque famille et permettant l'application d'un facteur de marge sur les activités radiologiques.

A ce stade, les déchets MA-VL et HA représentent respectivement de l'ordre de 5 % et 95 % de l'inventaire radiologique total.

¹⁹ Colis de déchets vitrifiés non conformes à leurs spécifications de production, CSD-RU...

²⁰ Pour rappel, le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de l'ASN précise les éléments suivants :

- relativement aux données nécessaires - « L'évaluation des expositions individuelles à long terme nécessite de disposer [...] de l'ensemble des données décrivant le système de stockage (inventaire de l'activité stockée, caractéristiques des différents composants, architecture de l'installation de stockage...). Ces données doivent être soit des données pessimistes tendant à majorer l'estimation de l'impact radiologique, soit des données moyennes (ou probables) complétées par des fourchettes d'incertitudes et des estimations des variations possibles avec le temps.» ;
- relativement à la connaissance des déchets - « [...] Il importe notamment de déterminer les caractéristiques radioactives des colis de déchets et leur inventaire en radionucléides. En particulier, une bonne estimation de l'activité des radionucléides à période longue ainsi que de celle des radionucléides volatils doit être obtenue [...] ».

2.2.1 Démarche de construction de l'inventaire et de traitement des incertitudes

2.2.1.1 Présentation générale

La Figure 2.2-1 présente la succession des opérations qui aboutit à l'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation de sûreté après fermeture. Elle comprend les trois étapes clés suivantes :

- la définition de « périmètres d'analogies » pour les familles sans dossier de connaissances établi par le producteur ; ces périmètres permettent une estimation « enveloppe » des inventaires radiologiques manquants ;
- l'attribution d'un « niveau de connaissance » à chacune des familles de colis ;
- l'application de facteurs de marge modulés en fonction du niveau de connaissance de chaque famille.

Sans préjuger des sélections des radionucléides qui sont à terme retenus pour les évaluations, tous les radionucléides ayant une période supérieure à 0,5 ans et inférieure à 50 milliards d'années sont considérés. Pour chacune des familles, les données correspondant à ces 144 radionucléides²¹ sont systématiquement recherchées dans les informations disponibles auprès des producteurs. Ces données sont individuellement codifiées afin de permettre un traitement spécifique. Une fois constitué, l'inventaire radiologique est « distribué » dans l'architecture de l'installation souterraine de Cigéo. Cette distribution est présentée dans le chapitre du présent volume relatif à l'architecture de Cigéo.

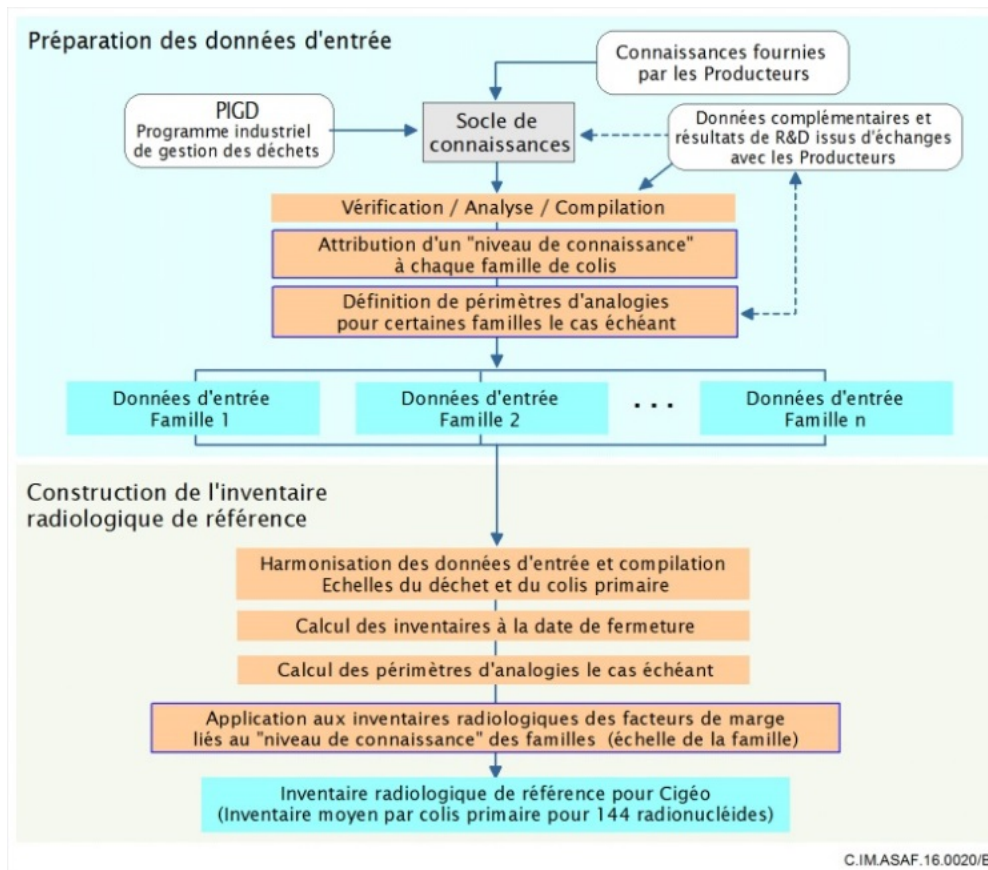


Figure 2.2-1 : Synoptique de construction de l'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation de sûreté après fermeture de Cigéo

²¹ Le curium-242 de période 0,45 ans est également pris en compte en raison de la présence de radionucléides de plus de six mois de période dans sa chaîne de filiation.

2.2.1.2 Niveau de connaissance attribué aux familles de colis

Le niveau de connaissance attribué à chaque famille de colis de déchets est défini sur une échelle en comportant quatre :

- niveau 3 : niveau connaissance correspondant à des incertitudes résiduelles faibles sur l'inventaire radiologique ; les familles de colis dont la production est terminée ou en cours et pour lesquelles les inventaires radiologiques du socle de connaissances sont cohérents avec le retour d'expérience de production relèvent de ce niveau ;
- niveau 2 : niveau de connaissance intermédiaire ;
- niveau 1 : niveau de connaissance correspondant à des incertitudes résiduelles sur l'inventaire radiologique susceptibles d'être réduites ; les familles de colis de déchets pour lesquelles l'inventaire radiologique n'a pas été mis à jour au stade actuel pour tenir compte d'une évolution de conditionnement entrent dans cette catégorie ;
- niveau 0 : niveau attribué aux familles pour lesquelles l'Andra ne dispose pas d'éléments ; les inventaires radiologiques des familles de colis relevant de ce niveau sont déterminés par application d'un périmètre d'analogies²².

Au stade actuel, les niveaux de connaissance sont attribués en cohérence avec la démarche générale visant à fournir une évaluation « enveloppe » de l'inventaire radiologique. Cela est vrai en particulier pour les familles regroupant des colis de déchets en cours de production²³ pour lesquelles le conditionnement des déchets est défini et une spécification de production des colis existe (cf. section 2.1). Pour ces familles, l'Andra a fait le choix de ne pas attribuer le meilleur niveau de connaissance tant que la production n'est pas achevée. La prise en compte d'éléments complémentaires comme le REX de production pourra conduire, à l'avenir, à faire évoluer dans le sens d'une amélioration les niveaux de connaissance de certaines familles.

2.2.1.3 Facteurs de marge sur l'activité des radionucléides

A l'échelle de Cigéo, la prise en compte des marges représente une augmentation d'un facteur de l'ordre de 2,2 sur l'activité totale en début de phase après fermeture par rapport à une compilation sans marge.

Les facteurs de marge sont modulés en fonction du niveau de connaissance et appliqués à l'activité massique moyenne de chaque radionucléide fournie par le producteur ou déduite du périmètre d'analogie (cf. Tableau 2.2-1). Les activités massiques obtenues sont ensuite compilées aux différentes échelles : colis primaire, famille, quartier de Cigéo.

Tableau 2.2-1 : Facteurs de marge appliqués aux activités en fonction du niveau de connaissance

Niveau de connaissance des familles		Facteur multiplicateur des activités massiques
Incertitudes résiduelles faibles sur l'inventaire radiologique	3	1,5
Niveau de connaissance intermédiaire	2	2,0
Incertitudes résiduelles sur l'inventaire radiologique susceptibles d'être réduites	1	5,0
Familles sans inventaire radiologique (définition par « périmètre d'analogies »)	0	10,0

²² Le périmètre d'analogies permet de déterminer de manière enveloppe la masse moyenne de déchet par colis primaire et l'activité massique du déchet.

²³ La notion d'état de production est liée à la famille de colis et non aux colis eux-mêmes. Il convient en outre de noter que : (i) lorsqu'une famille regroupe des colis primaires déjà tous produits mais devant faire l'objet d'une mise en surfût avant envoi à Cigéo (cas des bitumes de Marcoule, par exemple), la production de cette famille est considérée comme terminée ; (ii) lorsqu'une famille comprend des colis primaires devant faire l'objet d'un reconditionnement, d'autant plus si le conteneur primaire est défini par le producteur comme « à déterminer », la production de cette famille est considérée comme future.

Les facteurs de marges sont choisis dans le strict objectif d'une quantification « enveloppe » des scénarios de sûreté après fermeture²⁴.

La compilation des familles permet d'évaluer la répartition des facteurs de marge au prorata du nombre de colis de déchets (Cf. illustration dans le Tableau 2.2-2).

Tableau 2.2-2 : Illustration de la répartition à ce stade des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques moyens au prorata du nombre de colis de déchets

Cigéo - Inventaire de référence		
Quartiers	Facteurs de marge sur les inventaires moyens	Répartition des facteurs de marge au prorata du nombre de colis primaires
HA	1,5	12.3%
	2	79.2%
	5	5.9%
	10	2.6%
MA-VL	1,5	5.2%
	2	43.8%
	5	45.1%
	10	5.9%

2.2.2 Inventaire radiologique des colis de déchets

La démarche a été mise en œuvre pour évaluer l'inventaire des 144 radionucléides. Les tableaux présentés dans les sections qui suivent se focalisent sur les activités en début de phase après fermeture pour les radionucléides à vie longue suivants :

- le nickel 63 et le nickel 59 ;
- l'américium 241, l'américium 243 et le technétium 99 ;
- le carbone 14 ;
- le chlore 36 et l'iode 129 ;
- le sélénium 79.

2.2.2.1 Inventaire radiologique des colis de déchets MA-VL

Dans le cadre de l'évaluation de sûreté après fermeture présentée au volume III, la mise en œuvre de la démarche ci-avant conduit à retenir à ce stade une activité globale de $8,93.10^{18}$ Bq²⁵ en début de phase après fermeture^{26 27}. Le facteur d'atténuation global après fermeture est d'environ 2 à 100 ans, 15 à 500 ans et 40 à 2000 ans (Cf. Figure 2.2-2).

Le nickel 63 est le radionucléide dominant en termes d'activité. Viennent ensuite l'américium 241 vers 500 ans puis le nickel 59 jusqu'au-delà de 100 000 ans.

²⁴ Les activités radiologiques qui en résultent ne sont pas directement comparables à celles qui sont retenues pour le dimensionnement thermique de Cigéo ou pour la sûreté en exploitation.

²⁵ Cette activité représente environ 1/13^{ème} de l'ensemble de l'activité HA.

²⁶ Toutes les activités radiologiques de l'inventaire à terminaison ont été recalées par rapport à une date arbitraire commune fixée à 2140.

²⁷ Par souci de simplicité, le vieillissement des familles dont l'inventaire est défini à « t production » est réalisé à partir de la fin de la période de production.

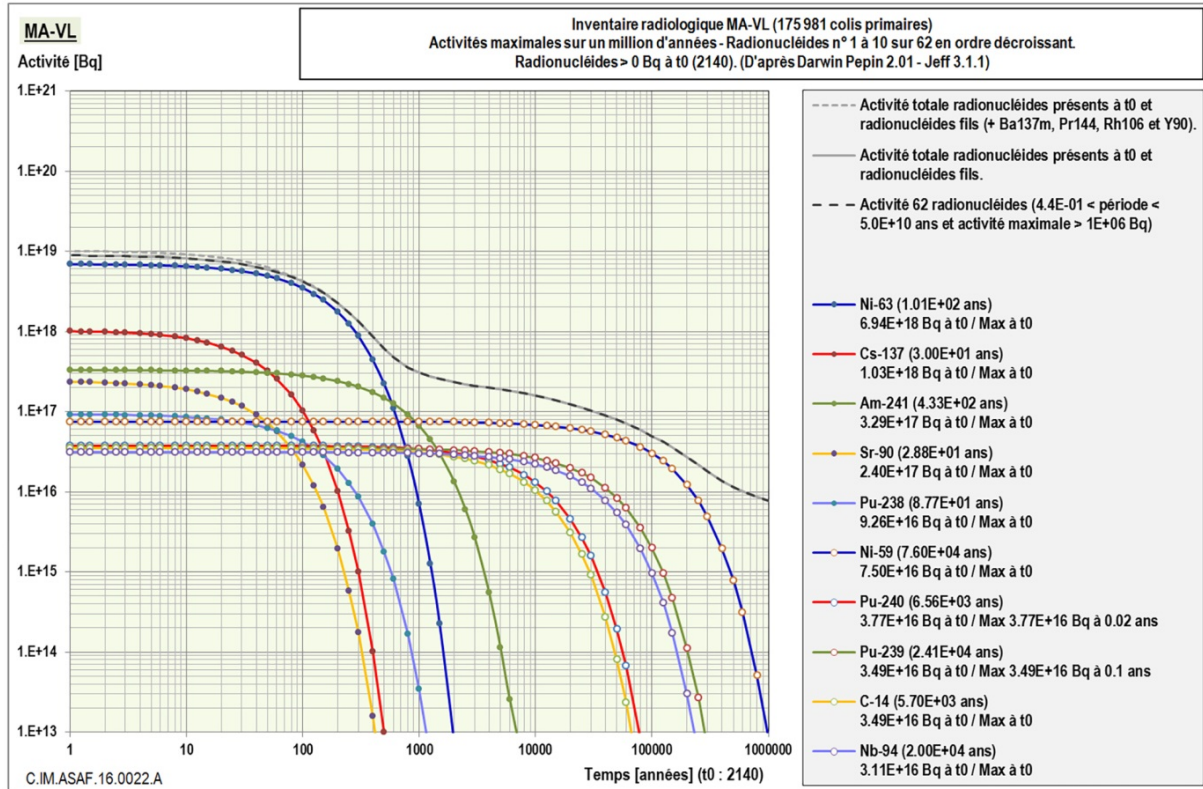


Figure 2.2-2 : Evolution de l'activité des 10 radionucléides présentant les plus fortes activités maximales sur 1 million d'années après fermeture de Cigéo

Le Tableau 2.2-3 précise les activités en début de phase après fermeture pour les radionucléides à vie longue.

Tableau 2.2-3 : Déchets MA-VL : illustration d'activités totales pour une sélection de radionucléides à vie longue

Radionucléide	Période en années (D'après Jeff 3.1.1)	Activité en début de phase après fermeture en Bq (Inventaire radiologique de référence)
⁶³ Ni	1,01.10 ²	6,94.10 ¹⁸ (52 800 moles)
²⁴¹ Am	4,33.10 ²	3,29.10 ¹⁷ (10 800 moles)
⁵⁹ Ni	7,60.10 ⁴	7,50.10 ¹⁶ (431 000 moles)
¹⁴ C	5,70.10 ³	3,49.10 ¹⁶ (15 100 moles)
³⁶ Cl	3,01.10 ⁵	8,25.10 ¹³ (1 880 moles)
⁷⁹ Se	3,77.10 ⁵	3,94.10 ¹³ (1 120 moles)
¹²⁹ I	1,61.10 ⁷	1,90.10 ¹² (2 310 moles)
Total pour les 144 radionucléides	-	8,93.10¹⁸

Le Tableau 2.2-4 montre l'évolution au cours du temps :

- de l'activité totale ;
- de la distribution de l'activité entre radionucléides à vie courte et vie longue ;
- de la part d'activité des actinides ;
- de la distribution de l'activité entre émetteurs alpha et émetteurs bêta gamma.

Tableau 2.2-4 : Déchets MA-VL - Evolution de la distribution relative des radionucléides au cours du temps

Inventaire radiologique de référence MAVL												
175 981 colis primaires	Année 2140	10	50	100	500	1 000	5 000	10 000	50 000	100 000	500 000	1 000 000
Activité totale (144 RN) [Bq]	8.93E+18	8.18E+18	5.94E+18	4.18E+18	6.10E+17	3.05E+17	1.90E+17	1.59E+17	7.93E+16	4.97E+16	1.15E+16	7.67E+15
Activité totale vies courtes [%]	14.8	12.7	6.9	3.2	1.3	2.4	2.2	2.1	3.8	6.0	18.5	20.2
Activité totale vies longues [%]	85,2	87,3	93,1	96,8	98,7	97,6	97,8	97,9	96,2	94,0	81,5	79,8
Activité actinides [%]	5,9	6,2	7,5	9,6	37,1	46,2	30,9	28,6	18,1	15,4	37,1	43,5
Activité alpha [%]	5,7	6,1	7,6	9,7	37,9	47,5	31,7	29,2	19,4	17,3	40,6	45,1
Activité bêta gamma [%]	94,3	93,9	92,4	90,3	62,1	52,5	68,3	70,8	80,6	82,7	59,4	54,9

2.2.2.2 Inventaire radiologique des colis de déchets HA

Les activités globales des quartiers HA0 et HA1-HA2 pour les 144 radionucléides retenus sont dans un rapport de 1 à environ 90 : $1,33 \cdot 10^{18}$ Bq pour HA0 et $1,17 \cdot 10^{20}$ Bq pour l'ensemble HA1 et HA2.

Inventaire radiologique des familles de colis du quartier HA0

La Figure 2.2-3 montre l'évolution de l'activité totale sur 1 million d'années ainsi que celle des 10 radionucléides ayant la plus forte activité sur 1 million d'années.

Pour les colis de déchets HA0, le césium 137 et le strontium 90 présentent les activités dominantes jusqu'à environ 100 ans après la fermeture. Au-delà, l'activité de l'américium 241 devient dominante jusqu'à environ 2000 ans. Pour l'ensemble des 144 radionucléides, le facteur d'atténuation après fermeture est d'environ 5 à 100 ans, 25 à 500 ans et 120 à 2000 ans.

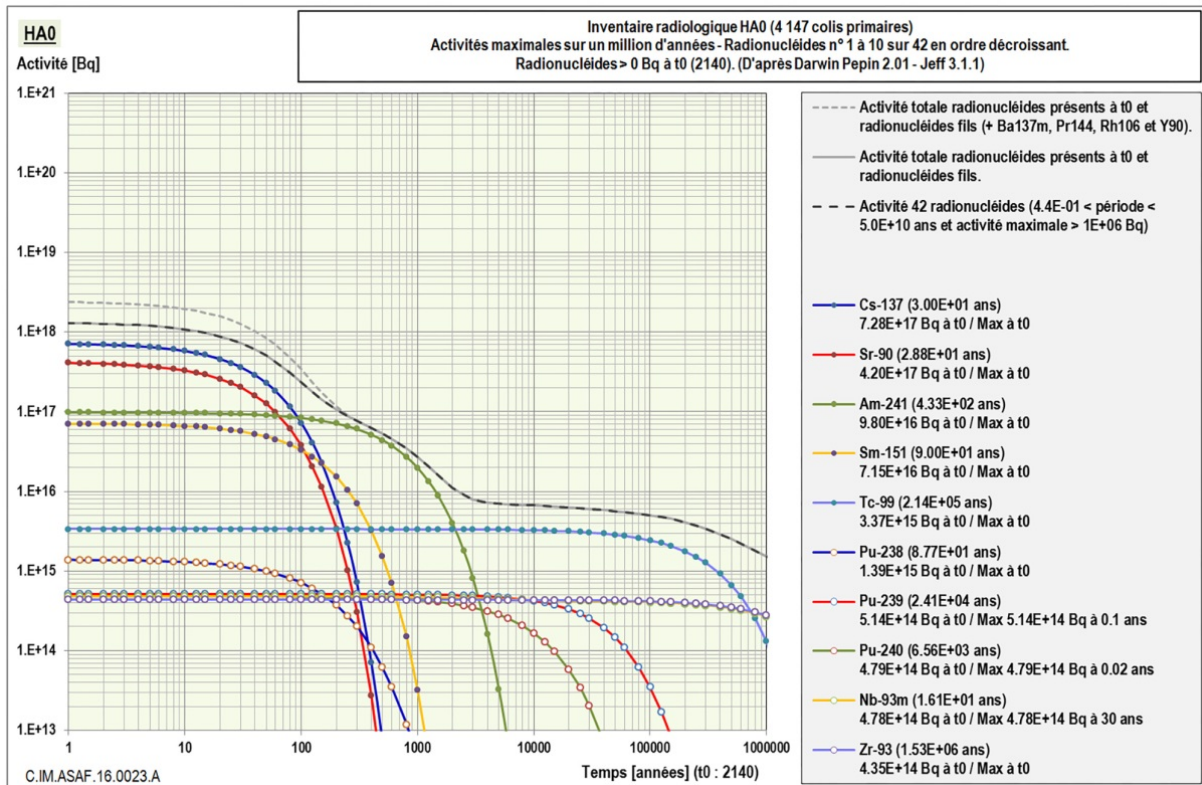


Figure 2.2-3 : Illustration de l'évolution de l'activité des 10 radionucléides présentant les plus fortes activités maximales sur 1 Ma pour les colis HA

Le Tableau 2.2-5- précise les activités à la date de fermeture pour les radionucléides à vie longue.

Tableau 2.2-5 : Déchets HA0 (peu à moyennement exothermiques) : activités totales pour une sélection de radionucléides à vie longue

Radionucléide	Période en années (D'après JEFF 3.1.1)	Activité en début de phase après de fermeture en Bq (Inventaire radiologique de référence)
²⁴¹ Am	4,33.10 ²	9,80.10 ¹⁶ (3 220 moles)
⁹⁹ Tc	2,14.10 ⁵	3,37.10 ¹⁵ (54 900 moles)
⁷⁹ Se	3,77.10 ⁵	7,80.10 ¹³ (2 220 moles)
³⁶ Cl	3,01.10 ⁵	1,64.10 ¹¹ (4,24 moles)
¹⁴ C	5,70.10 ³	4,77.10 ¹⁰ (0,021 moles)
¹²⁹ I	1,61.10 ⁷	2,98.10 ¹⁰ (36,4 moles)
Total 144 radionucléides	-	1,33.10¹⁸

Le Tableau 2.2-6 montre l'évolution au cours du temps de l'activité totale et de celle des actinides ainsi que la distribution entre vies courtes et vies longues et entre émetteurs alpha et émetteurs bêta gamma.

Tableau 2.2-6 : Déchets HA0 (peu à moyennement exothermiques) - Evolution de la distribution relative des radionucléides au cours du temps

Inventaire radiologique de référence HA0												
4 147 colis primaires	Année 2140	10	50	100	500	1 000	5 000	10 000	50 000	100 000	500 000	1 000 000
Activité totale (144 RN) [Bq]	1.33E+18	1.08E+18	5.04E+17	2.35E+17	5.30E+16	2.71E+16	7.02E+15	6.67E+15	5.64E+15	5.01E+15	2.53E+15	1.54E+15
Activité totale vies courtes [%]	86,6	84,2	70,8	47,2	1,3	2,5	9,5	9,8	11,2	12,1	17,1	20,5
Activité totale vies longues [%]	13,4	15,8	29,2	52,8	98,7	97,5	90,5	90,2	88,8	87,9	82,9	79,5
Activité actinides [%]	7,7	9,3	18,7	36,9	87,5	81,1	28,6	26,2	21,1	21,1	32,4	42,7
Activité alpha [%]	7,7	9,3	18,7	36,9	87,8	81,8	31,3	29,0	24,3	24,4	34,8	43,5
Activité bêta gamma [%]	92,3	90,7	81,3	63,1	12,2	18,2	68,7	71,0	75,7	75,6	65,2	56,5

Inventaire radiologique des familles de colis des quartiers HA1 et HA2.

La Figure 2.2-4 montre l'évolution de l'activité totale sur 1 million d'années ainsi que celle des dix radionucléides ayant la plus forte activité sur 1 million d'années pour le quartier HA1-HA2.

A l'échelle de ces quartiers, le césium 137 et le strontium 90 présentent les activités dominantes jusqu'à environ 60 ans après la fermeture. Au-delà, l'activité de l'américium 241 devient dominante jusqu'à environ 2000 ans. Pour l'ensemble des 144 radionucléides, le facteur d'atténuation après fermeture est d'environ 5 à 100 ans, 15 à 500 ans et 95 à 2000 ans.

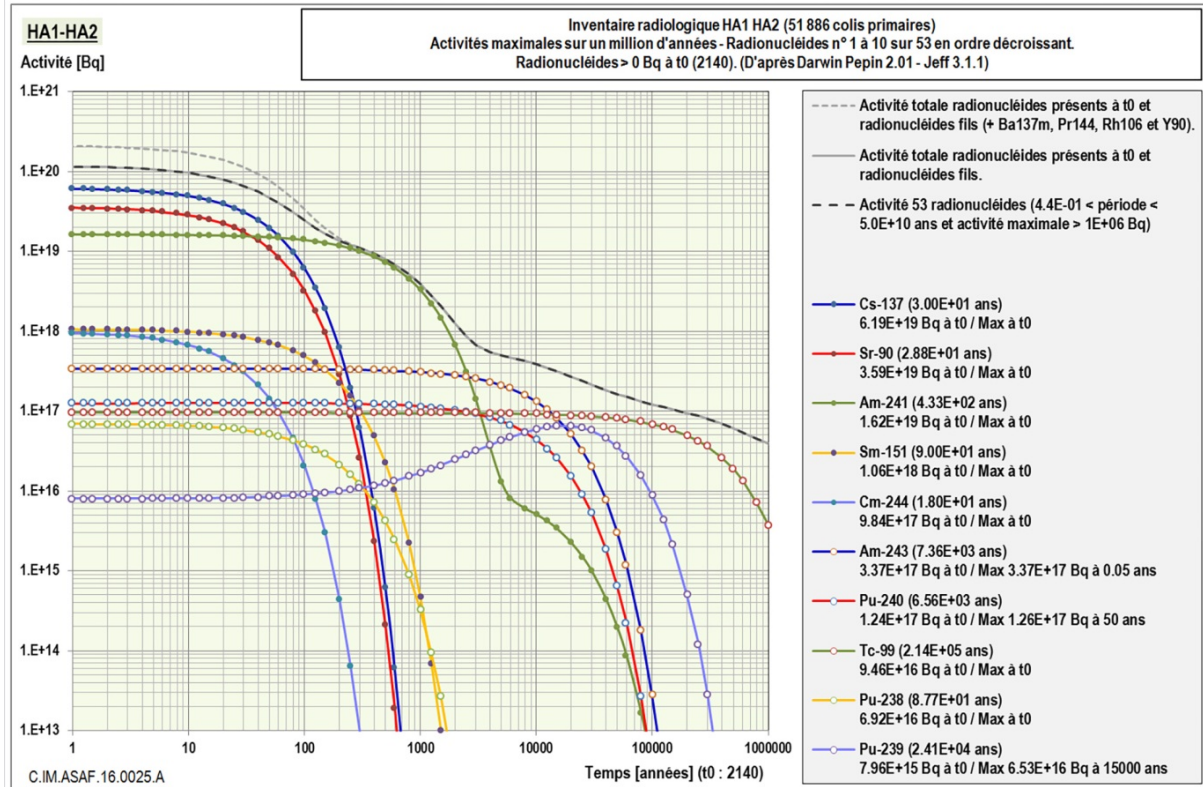


Figure 2.2-4 : Inventaire radiologique de référence des déchets HA fortement exothermiques. Evolution de l'activité des 10 radionucléides présentant les plus fortes activités maximales sur 1 million d'années

Le tableau ci-après présente à titre illustratif les activités à la date de fermeture pour les radionucléides à vie longue.

Tableau 2.2-7 : Déchets HA fortement exothermiques HA1 et HA2 - Activités au titre de l'inventaire radiologique de référence pour une sélection de radionucléides à vie longue

Radionucléide	Période en années (D'après Jeff 3.1.1)	Activité en début de phase après fermeture en Bq (Inventaire radiologique de référence)
¹⁴¹ Am	4,33.10 ²	1,62.10 ¹⁹ (532 000 moles)
¹⁴³ Am	7,36.10 ³	3,37.10 ¹⁷ (1,88 10 ⁵ moles)
⁹⁹ Tc	2,14.10 ⁵	9,46.10 ¹⁶ (1,53 10 ⁶ moles)
⁷⁹ Se	3,77.10 ⁵	1,28.10 ¹⁵ (36 600 moles)
¹⁴ C	5,70.10 ³	3,41.10 ¹⁴ (147 moles)
³⁶ Cl	3,01.10 ⁵	1,72.10 ¹⁴ (3 920 moles)
¹²⁹ I	1,61.10 ⁷	2,15.10 ¹² (2 620 moles)
<i>Total pour les 144 radionucléides</i>	-	1,17.10 ²⁰

Le Tableau 2.2-8 montre l'évolution au cours du temps de l'activité totale et de celle des actinides ainsi que la distribution entre vies courtes et vies longues et entre émetteurs alpha et émetteurs bêta gamma.

Tableau 2.2-8 : Déchets HA fortement exothermiques HA1 et HA2 - Evolution de la distribution relative des radionucléides au cours du temps

Inventaire radiologique de référence HA12												
51 886 colis primaires	Année 2140	10	50	100	500	1 000	5 000	10 000	50 000	100 000	500 000	1 000 000
Activité totale (144 RN) [Bq]	1.17E+20	9.59E+19	4.69E+19	2.45E+19	7.95E+18	3.88E+18	4.93E+17	3.85E+17	1.63E+17	1.21E+17	6.09E+16	3.92E+16
Activité totale vies courtes [%]	84,6	81,5	65,0	38,6	0,3	0,6	3,9	4,3	7,2	9,4	15,6	19,3
Activité totale vies longues [%]	15,4	18,5	35,0	61,4	99,7	99,4	96,1	95,7	92,8	90,6	84,4	80,7
Activité actinides [%]	15,3	18,0	33,5	58,9	98,0	96,6	73,9	67,1	30,5	17,2	29,0	41,6
Activité alpha [%]	15,2	18,0	33,4	58,8	97,9	96,4	72,4	65,8	30,4	17,2	29,0	41,6
Activité bêta gamma [%]	84,8	82,0	66,6	41,2	2,1	3,6	27,6	34,2	69,6	82,8	71,0	58,4

2.2.3 Inventaire en toxiques chimiques

L'établissement de l'inventaire en toxiques chimiques des colis de déchets de Cigéo suit une méthodologie comparable à celle utilisée pour l'inventaire radiologique. Le processus comprend ainsi un premier volet de compilation des données disponibles et un volet de traitement des incertitudes résiduelles liées au niveau de connaissance.

L'inventaire en toxiques chimiques sera établi à l'échéance de la demande d'autorisation de création pour chacun des 13 toxiques chimiques retenus par l'Andra : uranium, plomb, mercure, antimoine, cadmium, sélénium, arsenic, nickel, chrome, bore, béryllium, radical CN et amiante.

Il sera utilisé pour vérifier l'absence d'impact.

2.3 Les caractéristiques des colis primaires de déchets intervenant dans les fonctions de sûreté de Cigéo

En plus de leur inventaire radiologique, d'autres caractéristiques des colis primaires de déchets interviennent dans la réalisation de fonctions de sûreté après fermeture de Cigéo. En particulier, les caractéristiques de confinement favorables de certains déchets et/ou matrices de déchets des colis primaires sont mobilisées au-delà de la fermeture pour limiter le relâchement des substances radioactives contenues dans les déchets.

2.3.1 Les colis primaires de déchets HA

Les colis primaires de déchets HA se caractérisent par un dégagement de chaleur qui est pris en compte dans le dimensionnement : l'Andra a choisi de limiter la température et les effets thermo-hydrémécaniques sur le Callovo-Oxfordien dans un domaine (i) évitant une altération irréversible des caractéristiques du système de stockage contribuant aux fonctions de sûreté, particulièrement le Callovo-Oxfordien et (ii) dans lequel les processus régissant l'évolution du système de stockage peuvent être représentés et modélisés de manière fiable. Ce domaine est notamment défini par une température des alvéoles toujours inférieure à 100°C (en pratique un critère de 90°C est retenu dans les argilites). Le respect de ce domaine repose sur la conjugaison de la puissance thermique des colis, elle-même liée à leur contenu radiologique et à leur durée d'entreposage préalable, et du dimensionnement de l'installation souterraine.

Une grande part des colis primaires HA sont vitrifiés. Le verre nucléaire isole efficacement de l'eau les produits de fission et d'activation et les actinides mineurs qui y sont incorporés. Un relâchement des radionucléides ne peut s'effectuer qu'au fur et à mesure de l'altération du verre en présence d'eau (cf. annexe 7).

L'altération du verre dépend de ses caractéristiques intrinsèques (composition, taux de fracturation et surface spécifique) et des conditions d'environnement physico-chimiques, notamment :

- les vitesses d'altération augmentent avec la température : cela concerne tant la vitesse initiale qui s'instaure dès l'arrivée d'eau liquide (V_0) que la vitesse résiduelle après formation d'une couche réactive passivante (V_r) ;

- l'altération du verre est également sensible à la composition de l'eau entrant en contact avec le verre.

Pour mobiliser au mieux la capacité de confinement du verre, l'Andra a choisi de retarder l'arrivée d'eau sur ce verre, ce qui permet de bénéficier d'une diminution de la température au moment où l'eau parviendra au contact de celui-ci. Cette fonction relève de l'étanchéité à l'eau du conteneur de stockage (voir *infra*). On cherche aussi à limiter la concentration en alcalins et alcalino-terreux de l'eau présente dans l'alvéole lors de la perte de cette étanchéité : cela implique d'une part de limiter la quantité de ciment dans l'alvéole HA et d'y privilégier l'utilisation de ciment de pH initial strictement inférieur à 12,5, d'autre part d'éloigner les colis de déchets des galeries dont le revêtement est en béton.

En phase après fermeture, aucune fonction n'est rattachée au conteneur primaire HA.

2.3.2 Les colis primaires de déchets MA-VL

Les colis primaires MA-VL dont les caractéristiques contribuent particulièrement à limiter le relâchement de substances radioactives après fermeture comprennent :

- Les déchets métalliques activés (dont les déchets de structure des combustibles usés)

La part de l'activité associée à l'activation des radionucléides dans la masse métallique ne peut être relâchée qu'au fur et à mesure de la corrosion du métal. Après fermeture, la cinétique de corrosion est limitée (faible) de par des conditions réductrices et un pH basique dans les colis et les alvéoles ;

- Les déchets au sein desquels les radionucléides sont insolubilisés sous forme de sels peu solubles

L'insolubilisation des radionucléides sous forme de sels peu solubles contribue à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » en limitant la mise en solution des radionucléides.

De plus, dans le cas où ces sels sont enrobés dans une matrice de bitume, cette dernière assure une protection supplémentaire vis-à-vis de l'eau. Cette protection reste effective tant que l'enrobé conserve une géométrie proche de sa géométrie initiale dans le colis primaire, et que la viscosité du bitume évite une sédimentation des sels ; cela renvoie d'une part à la durabilité mécanique du conteneur de stockage (voir *infra*) et d'autre part à la température dans l'alvéole. De plus un pH compris entre 7 et 12,5 permet de rester dans un domaine où le comportement de l'enrobé est bien connu.

Il est à noter plus généralement que les matrices d'enrobage cimentaires favorisent le confinement au plus près des déchets, notamment en contribuant à appliquer un pH basique. Cependant ce facteur est à relativiser au regard de la masse alcaline plus importante apportée par les autres composants cimentaires présents dans les alvéoles.

Par ailleurs l'altération progressive de certains colis de déchets MA-VL peut générer des espèces chimiques susceptibles de perturber le fonctionnement du système de stockage. Cela concerne particulièrement les déchets organiques dont l'altération formera des espèces complexantes et des déchets salins susceptibles notamment d'affecter les conditions redox. La conception de l'installation souterraine prend en compte ces processus de manière à en limiter les effets vis-à-vis du comportement des radionucléides dans l'eau. Cela passe par des règles en matière de co-stockage de différentes familles dans un même alvéole et de séparation physico-chimique des alvéoles (cf annexe 9).

- Les déchets vitrifiés

Le verre nucléaire contribue à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » en limitant la mise en solution des radionucléides et des toxiques chimiques

2.3.3 Les modèles de relâchement retenus pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture

L'évaluation quantitative de sûreté après fermeture présentée au volume III rend compte des caractéristiques des déchets conditionnés favorables au confinement via l'adoption de modèles de

relâchement. Cette section décrit la démarche mise en œuvre par l'Andra pour définir ces modèles et en présente les principales conclusions.

2.3.3.1 Démarche de définition

La démarche pour le choix des modèles de relâchement et des paramètres associés est fondée sur le niveau de connaissance du comportement des déchets. En annexes 7 et 8 est synthétisé l'état de la connaissance sur le comportement des déchets HA et MA-VL en particulier les déchets vitrifiés, les déchets salins avec matrice bitume et les déchets métalliques activés. Cette connaissance repose sur plusieurs années d'études de R&D.

Pour chaque famille de colis de déchets, la démarche de définition des modèles de relâchement à retenir pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture suit les étapes suivantes illustrées en Figure 2.3-1 :

- les modèles de relâchement existants pour chaque famille de colis de déchets sont identifiés ainsi que leurs domaines d'applicabilité. Si aucun modèle ne peut être défini du fait d'un manque de connaissance ou si les modèles identifiés ne sont pas applicables dans les conditions du stockage, un modèle dit « labile » est retenu (c'est-à-dire un relâchement instantané à l'arrivée d'eau liquide) ;
- pour chacun des modèles applicables, le niveau de connaissances acquis est apprécié notamment au regard des expérimentations conduites et des incertitudes résiduelles intrinsèques au modèle ou liées aux conditions de stockage. A partir des résultats de cette analyse :
 - ✓ si le niveau de connaissance est élevé et les incertitudes résiduelles sont maîtrisées, le choix porte sur un modèle dit « phénoménologique » (23)
 - ✓ si la connaissance est sujette à de fortes incertitudes (de toute nature), le choix porte sur un modèle dit « conservatif » (23)

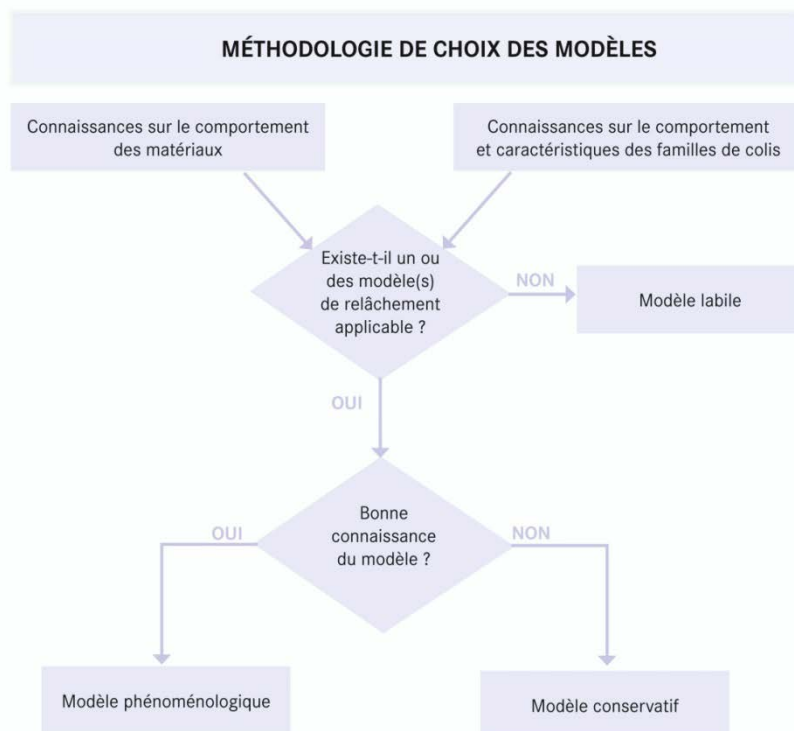


Figure 2.3-1 : Logigramme illustrant la stratégie de choix des modèles de relâchement des radionucléides pour l'évaluation de sûreté

Les modèles de relâchement reposent sur des paramètres liés aux caractéristiques intrinsèques des déchets conditionnés (composition des déchets par exemple) et à leur évolution dans le temps en fonction des conditions physico-chimiques (température, pH, redox...). A l'instar du choix des modèles, le choix des paramètres repose sur les principes suivants illustrés en Figure 2.3-2 ci-après :

- une bonne connaissance des paramètres du modèle, étayée notamment par des expérimentations, conduit à retenir des paramètres dits « phénoménologiques », issus des mesures disponibles ;
- si la connaissance est moins étayée par des expérimentations ou est entachée d'incertitudes résiduelles difficiles à maîtriser, la stratégie conduit à retenir des paramètres dits « maximaux ».

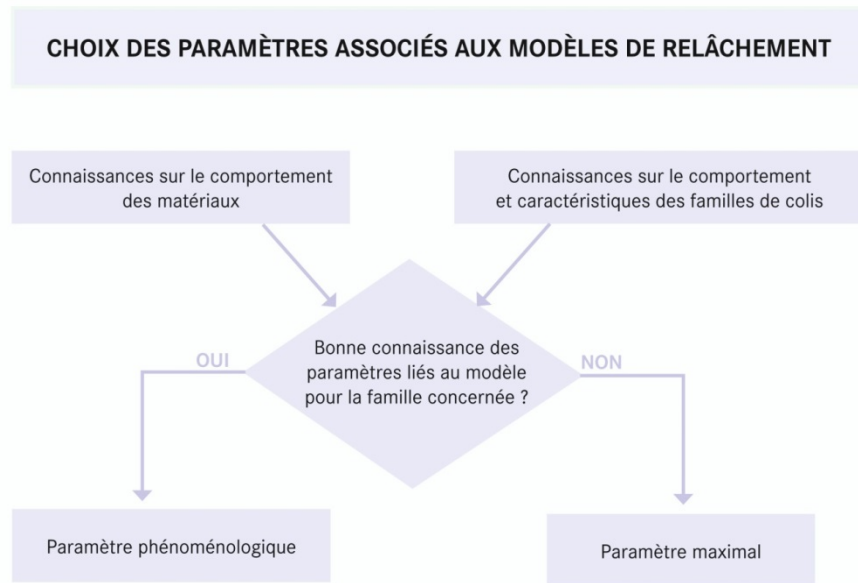


Figure 2.3-2 : Logigramme illustrant la méthodologie de choix des paramètres du modèle de relâchement retenu

2.3.3.2 Choix des modèles et des paramètres associés pour les colis de déchets HA

Le choix des modèles de relâchement et des paramètres associés pour les colis de déchets HA est détaillé dans le document (24). Il prend en compte les conditions d'environnement dans les alvéoles lors de l'arrivée d'eau liquide sur le verre nucléaire, après perte d'étanchéité des conteneurs de stockage.

Déchets HA vitrifiés

Les modèles retenus pour les colis de déchets HA vitrifiés sont résumés dans le Tableau 2.3-1.

- Le modèle fondé sur l'atteinte d'une vitesse résiduelle V_R est retenu en référence. Le modèle fondé uniquement sur la vitesse initiale (modèle $V_0.S$, - S désignant la surface spécifique du verre) est considéré en enveloppe pour tenir compte des incertitudes résiduelles sur le temps de passage de la vitesse initiale à la vitesse résiduelle, notamment selon l'influence du silicium, du fer et des produits de corrosion. De plus, ces incertitudes conduisent à retenir en référence les paramètres maximisant ce temps de passage.
- Un modèle de type labile est retenu pour certaines familles présentant une faible résistance à la lixiviation ou pour lesquelles les données disponibles (composition du verre, surface accessible à l'eau) ne permettent pas de paramétrer un modèle.

De manière conservatrice, les familles pour lesquelles l'influence de l'eau de site sur les vitesses d'altération n'a pas été mesurée sont considérées comme les familles présentant le plus grand écart entre les vitesses en eau pure et en eau de site, *i.e.* correspondant à la vitesse d'altération la plus importante.

Les valeurs de paramètres issues d'expérimentations ou de modélisations représentatives du domaine de composition de verres de la famille sont privilégiées en référence, notamment les valeurs issues de mesures représentatives des conditions de stockage.

Pour l'ensemble des familles, les valeurs maximales mesurées ou calculées sont retenues en situation enveloppe.

Tableau 2.3-1 : Choix des modèles de relâchement des colis de déchets HA vitrifiés

Typologie de familles de déchets	Familles de colis de déchets	Modèle(s) retenu(s) en référence	Modèle(s) retenu(s) en situation enveloppe
Colis de Déchets HA vitrifiés	<ul style="list-style-type: none"> • CEA-350 • CEA-1070 • CEA-1080¹ • COG-140 • COG-200 • COG-800 • COG-810¹ • COG-820¹ • COG-830 • COG-880 • COG-890 • COG-900 	Modèle avec atteinte d'une vitesse résiduelle V_r dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage avec : <ul style="list-style-type: none"> • Les paramètres phénoménologiques, voire maximaux pour les vitesses d'altération V_a et V_o, • les paramètres maximisant la durée de passage en V_r. 	COG-200, COG-810 ¹ et COG-830 : modèle labile dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage Autres familles : modèle « $V_a.S$ » dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage avec les paramètres maximisant les cinétiques de relâchement (valeurs maximales mesurées ou valeurs de référence avec incertitude ou écart type)
	<ul style="list-style-type: none"> • CEA-200 • CEA-1080¹ • COG-150 	Modèle « $V_a.S$ » dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage avec les paramètres phénoménologiques ou maximaux lorsque non disponibles	Pour les colis de la famille CEA-1080 ²⁸ : modèle labile dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage Autres familles : modèle « $V_a.S$ » dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage avec les paramètres maximisant les cinétiques de relâchement (valeurs maximales mesurées ou valeurs de référence avec incertitude ou écart type)
	<ul style="list-style-type: none"> • CEA-1190 • COG-810¹ • COG-820¹ 	Modèle labile dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage	Idem modèle retenu en référence

¹ Suivant la variabilité de la composition des verres au sein de la même famille

▪ **Déchets HA non vitrifiés**

En l'état des connaissances, il est retenu un modèle de type labile dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage pour les familles COG-850, COG-860, COG-870 et CEA-1500.

2.3.3.3 Choix des modèles et des paramètres pour les colis de déchets MA-VL

Le choix des modèles de relâchement et des paramètres associés est détaillé :

- pour les colis de déchets MA-VL vitrifiés dans le document (24);
- pour les colis de déchets MA-VL non vitrifiés dans le document (25).

▪ **Déchets MA-VL vitrifiés**

Pour les déchets MA-VL vitrifiés, à ce stade, un modèle fondé sur la seule vitesse initiale est retenu, compte tenu de l'environnement cimentaire de l'alvéole de stockage (voir *infra*). En effet, dans cet environnement, un risque de reprise d'altération ne peut pas être exclu.

²⁸ Issus de la campagne SG8

Un modèle de type labile est retenu pour la famille CEA-1120 contenant du béryllium, l'influence de cet élément dans le verre en termes d'homogénéité et de comportement à long terme n'étant pas connue à ce stade.

Au regard des résultats obtenus lors des expérimentations, de manière similaire aux colis de déchets HA vitrifiés, les valeurs de paramètres issues d'expérimentations ou de modélisations représentatives du domaine de composition de verres de la famille sont privilégiées en référence, notamment les valeurs issues de mesures représentatives des conditions de stockage.

Pour l'ensemble des familles, les valeurs maximales mesurées ou calculées sont retenues en situation enveloppe.

Le choix des modèles de relâchement pour les déchets MA-VL vitrifiés est résumé dans le tableau ci-après.

Tableau 2.3-2 : *Choix des modèles de relâchement des colis de déchets MA-VL vitrifiés*

Typologie de familles de déchets	Familles de colis de déchets	Modèle(s) retenu(s) en référence	Modèle(s) retenu(s) en situation enveloppe
Colis de déchets MA-VL vitrifiés	CEA-340 CEA-1120 COG-470	Modèle « V..S » avec les autres paramètres phénoménologiques, sauf si absence de donnée ou incertitude importante	Modèle « V..S » avec les paramètres maximisant les cinétiques de relâchement (valeurs maximales mesurées ou valeurs de référence avec incertitude ou écart type)
	CEA-1120 (colis contenant du béryllium)	Modèle labile	Idem modèle retenu en référence

▪ **Déchets salins avec matrice bitume**

L'aptitude du bitume à limiter le relâchement des radionucléides est traduit par le modèle de relâchement COLONBO. Ce modèle a été développé pour prendre en compte la capacité du bitume à limiter la reprise en eau et ainsi à limiter la mise en solution des radionucléides.

L'application du modèle COLONBO repose sur le maintien de la géométrie de l'enrobé. Du fait de son gonflement par radiolyse ou par reprise d'eau, l'enrobé peut potentiellement fluer hors du colis primaire. La durée pendant laquelle la géométrie des bitumes est garantie, et ainsi le modèle COLONBO applicable, dépend de la durée de la tenue mécanique des conteneurs de stockage. Pendant cette durée, le modèle retenu en référence est le modèle COLONBO pour les familles de colis de déchets pour lesquelles celui-ci est applicable, notamment en fonction de leurs teneurs massiques en sels solubles et l'absence d'autres déchets en mélange. Dès que l'intégrité du conteneur de stockage n'est plus assurée, le modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels est retenu.

Pour prendre en compte les incertitudes sur le domaine d'applicabilité du modèle COLONBO, en particulier sur le maintien de la géométrie de conteneur de stockage en béton, un modèle basé uniquement sur la solubilité des sels est retenu en situation enveloppe pour ces familles de colis de déchets.

Pour les familles de colis pour lesquelles le modèle COLONBO n'est pas applicable (23), seul le modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels est retenu.

Pour les paramètres associés au modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels, compte tenu des incertitudes sur l'association des radionucléides au sein des précipités d'entraînement (sels), toute l'activité radiologique des colis de déchets est associée au sel présentant la plus grande valeur de solubilité : le NaNO_3 (nitrate de sodium).

Les modèles de relâchement retenus à ce stade pour les colis de déchets salins sans matrice sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 2.3-3 : Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par famille de colis de déchets salins avec matrice bitume

Typologie de familles de déchets	Familles de colis de déchets	Modèle(s) retenu(s) en référence	Modèle(s) retenu(s) en situation enveloppe	
Déchets salins avec matrice bitume	CEA-1000 CEA-1010 CEA-1020 ¹ CEA-1021 ¹	COG-020 ² (97 % de l'ensemble des colis) COG-420 ³	COLONBO sur durée d'intégrité du conteneur de stockage puis solubilité des sels (valeurs de solubilité du NaNO ₃)	Uniquement solubilité des sels (valeurs de solubilité du NaNO ₃)
	CEA-1020 ¹ CEA-1021 ¹ COG-020 ³ (3 % de l'ensemble des colis)		Solubilité des sels (valeurs de solubilité du NaNO ₃)	Idem référence

¹ Suivant le mode de production des enrobés

² Enrobés bitumineux STE3 produits selon la spécification 300AQ027

³ Colis de déchets non instrumentés uniquement

▪ Déchets salins sans matrice

Le choix des modèles de relâchement pour les déchets salins sans matrice est détaillé dans le document (24).

Pour ces déchets, le modèle retenu repose sur la solubilité des sels (23).

Compte tenu des incertitudes sur l'association des radionucléides au sein des précipités d'entraînement (sels), toute l'activité radiologique des colis de déchets est associée au sel présentant la plus grande valeur de solubilité : le NaNO₃ (nitrate de sodium).

Les modèles de relâchement retenus à ce stade et les familles qui leur sont associées sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 2.3-4 : Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par la famille de colis de déchets salins sans matrice bitume

Typologie de familles de déchets	Familles de colis de déchets	Modèle(s) retenu(s) en référence	Modèle(s) retenu(s) en situation enveloppe
Déchets salins sans matrice (boues non bitumées)	COG-430	Solubilité des sels (valeurs de solubilité du NaNO ₃)	Idem référence

▪ Déchets métalliques compactés (sans matrice ciment)

Le choix des modèles de relâchement est basé sur la localisation des radionucléides dans les déchets :

- pour les radionucléides activés au sein des alliages, le modèle proposé est basé sur la corrosion. Toutefois ce modèle ne peut pas s'appliquer aux produits d'activation des fines de cisailage et des éclats de taille millimétrique compte-tenu de la petite taille des pièces et de leur surface spécifique. Pour ces produits de petites tailles, un modèle labile est retenu, et pour les autres produits métalliques, c'est le modèle basé sur la corrosion qui est retenu ;
- pour les radionucléides localisés au sein de la zircone et à la surface des différents matériaux, un modèle labile est retenu à ce stade.

Pour les familles de colis de déchets contenant des produits potentiellement agressifs, tels que les produits de dégradation des matières organiques, un relâchement labile est retenu à ce stade pour couvrir les incertitudes sur les vitesses de corrosion associées. Ainsi pour les familles contenant de faibles quantités de matières organiques, comme la famille COG-070 contenant des résines échangées d'ions (REI) et des joints en silicone, un modèle de type labile est retenu.

Pour les familles de colis de déchets contenant des mélanges de métaux susceptibles d'entraîner un couplage galvanique, un modèle labile est retenu pour couvrir les incertitudes associées aux vitesses de corrosion.

Pour le modèle de relâchement basé sur les vitesses de corrosion, compte-tenu du milieu cimentaire imposé par l'alvéole de stockage, la vitesse de corrosion maximale sous eau cimentaire est retenue pour chacun des alliages métalliques considérés (alliages de zirconium, aciers inoxydables et alliages de nickel). Pour ce modèle, il est considéré de manière conservatrice que toute l'activité est concentrée dans les pièces les moins épaisses :

- pour les alliages du zirconium, les épaisseurs des coques sans les couches d'oxydes sont retenues ;
- pour les aciers inoxydables et les alliages de nickel, les épaisseurs des ressorts en Inconel et les ressorts de crayons en acier inoxydable sont retenues.

Pour les familles de colis de déchets contenant une teneur significative en fines la teneur en fines fournie par les producteurs est retenue en référence.

Un facteur de marge de 2²⁹ sur cette valeur est retenu pour prendre en compte les incertitudes sur la teneur en fines et également sur les vitesses de corrosion des éléments métalliques.

Les modèles de relâchement retenus à ce stade pour les familles de colis de déchets métalliques compactes sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 2.3-5 : *Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par famille de colis de déchets métalliques compactés (sans matrice ciment)*

Typologie de familles de déchets	Familles de colis de déchets	Modèle(s) retenu(s) en référence	Modèle(s) retenu(s) en situation enveloppe
Déchets métalliques sans matrice ciment	COG-100 COG-110 COG-120	Corrosion généralisée des éléments métalliques activés Labile pour les fines et éclats, la zircone et la contamination surfacique	Idem référence avec un facteur de marge de 2 sur la valeur de la fraction de fines et éclats
	COG-070 COG-540 COG-450 COG-550 COG-530	Labile	Idem référence

▪ **Déchets métalliques avec matrice ciment**

Pour les déchets métalliques avec une matrice ciment, le choix des modèles de relâchement est identique à celui appliqué pour les colis de déchets métalliques compactés (sans matrice ciment). Compte-tenu de la matrice cimentaire des colis de déchets ainsi que du milieu cimentaire de l'alvéole de stockage, les vitesses de corrosion retenues prennent en compte le milieu cimentaire pour chacun des alliages. Les modèles de relâchement retenus à ce stade pour les familles de colis de déchets métalliques compactes sont synthétisés dans le tableau ci-après.

²⁹ Facteur de marge appliqué au cas enveloppe des scénarios.

Tableau 2.3-6 : Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture par famille de colis de déchets métalliques avec matrice ciment

Typologie de familles de déchets	Familles de colis de déchets	Modèle(s) retenu(s) en référence	Modèle(s) retenu(s) en situation enveloppe
Déchets métalliques avec matrice ciment	EDF-080	Corrosion généralisée des éléments métalliques activés Labile pour les autres éléments	idem référence
	COG-040 EDF-090 CEA-1050 CEA-1060	Labile	Idem référence

▪ **Autres colis de déchets MA-VL**

La connaissance des autres familles de colis de déchets MA-VL ne permet pas de leur affecter des propriétés de confinement. Un relâchement labile est retenu à ce stade pour ces familles de colis de déchets. Les familles concernées sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 2.3-7 : Modèles de relâchement retenus pour les évaluations de sûreté après fermeture pour les autres familles de colis de déchets MA-VL

Typologie de familles de déchets	Familles de colis de déchets			Modèle(s) retenu(s) en référence	Modèle(s) retenu(s) en situation enveloppe
Autres colis de déchets MA-VL	AND-000	CEA-360	CEA-1510	Labile	Labile
	CEA-050	CEA-370	COG-020 ¹		
	CEA-060	CEA-380	COG-030		
	CEA-070	CEA-400	COG-050		
	CEA-080	CEA-410	COG-400		
	CEA-090	CEA-420	COG-420 ²		
	CEA-100	CEA-430	COG-440		
	CEA-110	CEA-440	COG-460		
	CEA-120	CEA-450	COG-480		
	CEA-140	CEA-460	COG-490		
	CEA-150	CEA-480	COG-500		
	CEA-231	CEA-1040	COG-510		
	CEA-232	CEA-1090	COG-520		
	CEA-270	CEA-1100	EDF-100		
	CEA-280	CEA-1110	EDF-110		
	CEA-290	CEA-1140	EDF-120		
	CEA-300	CEA-1151	EDF-250		
	CEA-310	CEA-1152	ITER-010		
	CEA-320	CEA-1180			
	CEA-330	CEA-1200			

¹ Enrobés bitumineux STE3 produits hors de la spécification 300AQ027

² Colis de déchets instrumentés de la famille COG-420

2.4 Les conteneurs de stockage HA

2.4.1 Contributions des conteneurs de stockage HA aux fonctions de sûreté

En retardant l'arrivée d'eau sur les déchets HA vitrifiés, le conteneur de stockage des déchets HA contribue à limiter le relâchement des substances radionucléides et toxiques chimiques et à les immobiliser au plus près des déchets :

- il évite d'exposer le verre nucléaire à l'altération aqueuse en température (voir *supra*) ;
- il évite corollairement la mise en solution de radionucléides en température ; la température tend à augmenter les cinétiques de dissolution et les vitesses de diffusion ; elle accroît les incertitudes sur le comportement des radionucléides, en solution et à la surface des phases solides (sorption) ;
- plus généralement, il évite tout relâchement de radionucléides dans les premières phases transitoires après fermeture, plus complexes à modéliser.

Le conteneur de stockage assure à lui seul le confinement des colis de déchets HA aussi longtemps qu'il conserve son étanchéité à l'eau. Cela correspond à une première période après fermeture caractérisée par une activité encore élevée des radionucléides à périodes courtes et moyennes des déchets HA. Il évite pendant cette période une exposition radiologique inacceptable dans toute situation hypothétique qui se traduirait par un court-circuit de la capacité du système de stockage à retarder et atténuer la migration, comme dans l'hypothèse d'une intrusion involontaire qui interviendrait de manière précoce ; au-delà, la décroissance radioactive des radionucléides à périodes courtes et moyennes réduira l'impact radiologique d'une telle situation.

L'Andra conçoit le conteneur de stockage HA de manière à lui conférer la plus grande durabilité possible d'étanchéité, en tenant compte des incertitudes scientifiques, des limites technologiques et des facteurs économiques. Cette conception s'effectue de manière conjointe avec celle de l'alvéole, qui impose au conteneur ses conditions d'environnement.

L'Andra retient à ce stade³⁰ de vérifier que l'étanchéité à l'eau du conteneur de stockage HA sera maintenue *a minima* tant que la température à cœur du verre est supérieure à 50 °C pour les déchets HA0 (moyennement exothermiques) livrés avant 2075 et à 70 °C pour les déchets HA1/HA2 (fortement exothermiques) livrés au-delà de 2075. La valeur plus élevée retenue pour les déchets HA1/HA2 s'explique par les progrès des connaissances attendus dans les prochaines décennies sur le comportement du verre nucléaire et celui des radionucléides en solution. Avec l'architecture retenue pour l'installation souterraine (chapitre 3), ces limites correspondent à une durée de moins de 500 ans après la fermeture de Cigéo.

2.4.2 Options de conception retenues pour le conteneur de stockage HA

L'Andra a retenu comme matériau constitutif du conteneur l'acier non allié à bas carbone. Ce choix est justifié par le caractère prédictible de la cinétique de corrosion de ce matériau, dans la mesure où la corrosion généralisée en est le mécanisme prépondérant par rapport aux processus de corrosion localisée.

En milieu anoxique, la vitesse de corrosion généralisée des aciers non alliés est faible et ces aciers sont peu sensibles à la corrosion localisée : le milieu géologique contient peu d'espèces oxydantes susceptibles d'alimenter la réaction cathodique d'une corrosion localisée. L'Andra mène des essais de corrosion dans des milieux représentatifs de l'évolution des alvéoles de stockage pour vérifier la prépondérance de la corrosion généralisée, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 10 micromètres par an au maximum.

Les aciers non alliés bénéficient d'une codification et d'une normalisation des techniques d'élaboration et de contrôle dont l'emploi garantit que les propriétés physiques (mécaniques, dimensionnelles, métallurgiques, chimiques..) des objets réalisés sont reproductibles et constantes.

Le conteneur est conçu de sorte à réduire le risque d'apparition de processus de corrosion localisée et sous contrainte : les dispositions techniques correspondantes sont détaillées plus loin.

Le corps du conteneur est constitué d'une virole cylindrique en acier non allié d'épaisseur utile³¹ comprise entre 65 et 53 mm, d'un fond soudé d'une épaisseur adaptée à l'épaisseur de la virole et d'un couvercle réalisé dans la même nuance d'acier. L'ensemble des soudures d'assemblage sont

³⁰ Ces contraintes de température pourront être revues d'ici à la DAC au regard des avancées de connaissances, notamment sur le comportement des radionucléides en température.

³¹ Ces épaisseurs pourront encore faire l'objet d'optimisations d'ici à la DAC.

réalisées à pleine épaisseur pour réduire leur caractère singulier en termes de résistance et d'étanchéité.

L'épaisseur d'acier assure à la fois :

- la résistance mécanique ;
- la résistance à la corrosion : une partie de l'épaisseur est « consommée » au cours du temps par la corrosion généralisée ;
- une atténuation du rayonnement : ce dernier est en effet susceptible d'accélérer la corrosion et de favoriser une piqûration (voir plus loin).

Si, d'une manière générale, la résistance mécanique et à la corrosion ainsi que l'atténuation du rayonnement croissent avec l'épaisseur d'acier, les contraintes technologiques en matière de mise en œuvre limitent cette épaisseur : en particulier les opérations de soudage et de détensionnement (voir *infra*) se complexifient avec l'épaisseur, ce qui impacte la maîtrise de la qualité du produit. Le choix de l'épaisseur du conteneur résulte donc de la prise en compte de ces divers paramètres dans une optique d'optimisation. Le conteneur de stockage, de géométrie cylindrique, est dimensionné pour accueillir un ou deux colis primaires selon la famille considérée. Pour certains colis primaires de longueur réduite, la possibilité d'introduire trois colis est également ouverte. Différents modèles de colis de stockage HA sont présentés en annexe 5. Les figures suivantes illustrent des colis de stockage de déchets HA vitrifiés produits respectivement par l'Atelier de Vitrifaction de Marcoule (AVM) et les ateliers R7-T7 de La Hague.

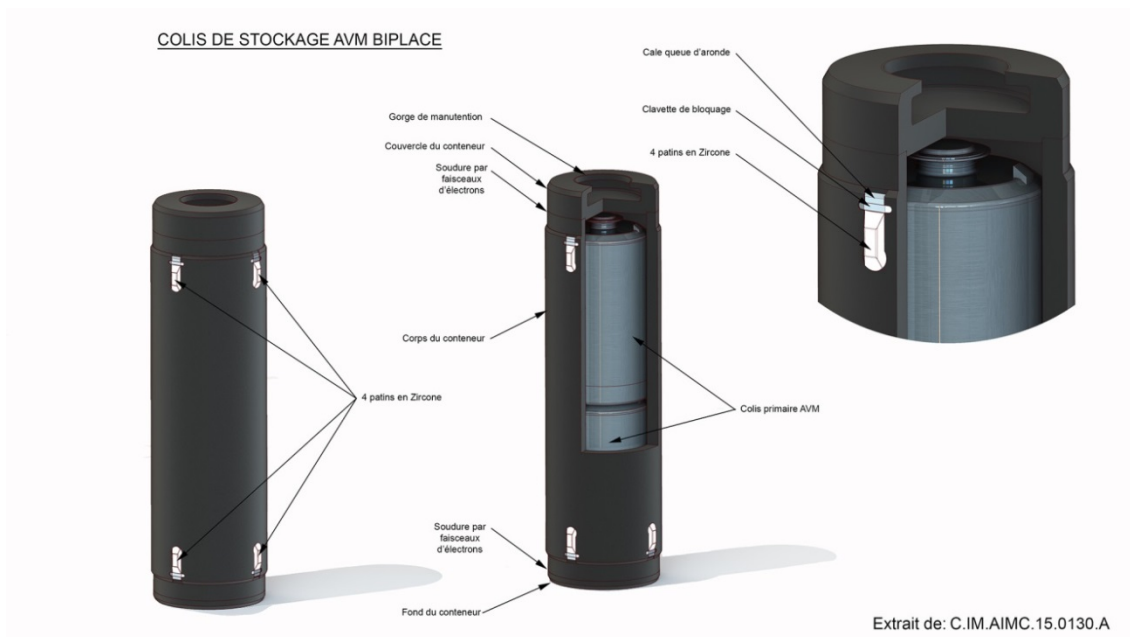


Figure 2.4-1 : Illustration d'un colis de stockage de déchets vitrifiés de type AVM biplace



Figure 2.4-2 : Illustration d'un colis de stockage de déchets vitrifiés de type R7-T7

2.4.3 Exigences vis-à-vis du risque de corrosion sous contrainte

Le phénomène de corrosion sous-contrainte (CSC) peut apparaître sous l'action conjuguée :

- d'une contrainte mécanique de traction : il peut s'agir d'une contrainte résiduelle issue des processus de mise en forme et de soudage ou d'une contrainte générée par la charge mécanique appliquée sur le conteneur ;
- d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, notamment la présence de dihydrogène (fragilisation).

Pour réduire le risque de corrosion sous contrainte, l'Andra retient deux exigences :

- des contraintes mécaniques favorables dans l'acier constitutif du conteneur : la conception de l'alvéole, particulièrement le rôle de son chemisage vis-à-vis du chargement mécanique du conteneur, l'épaisseur du conteneur, en tenant compte de sa « consommation » progressive par corrosion généralisée, et la limite élastique de l'acier qui le constitue visent à maintenir autant que possible ce dernier dans le domaine élastique. Par ailleurs un détensionnement de l'ensemble des soudures du conteneur permet de limiter les contraintes résiduelles à moins de 30 % de la limite d'élasticité de l'acier ;
- la sélection d'une nuance d'acier³², de sa propreté (notamment une limitation de la teneur en phosphore et en oxygène) et de sa microstructure (taille de défauts internes) leur conférant (i) une ductilité élevée qui s'oppose à la propagation de fissures en cas de plastification, et (ii) une sensibilité aussi faible que possible à la corrosion sous contrainte³³.

2.4.4 Exigences vis-à-vis du risque de corrosion radiolytique

Le rayonnement des déchets HA peut entraîner par radiolyse la production d'espèces oxydantes (comme H₂O₂) ou d'espèces chimiques modifiant localement le pH du milieu (comme HNO₃). Ces espèces chimiques contribuent à l'augmentation des cinétiques de corrosion généralisée des matériaux métalliques et favorisent l'occurrence de phénomènes de corrosion localisée. En l'état des connaissances :

- aucun effet de la radiolyse de l'eau n'est observé sur la corrosion pour des débits de doses inférieurs à 1 gray par heure ;

³² Un acier forgé à haute ductilité tel que P285NH peut répondre à ces exigences

³³ La réduction du taux d'impuretés et d'inclusions limite la corrosion anodique. La structure ferrite-perlite fine et homogène est peu fragile et peu sensible à la corrosion sous contrainte et à la corrosion localisée.

- il y a peu d'influence de la radiolyse pour des débits de doses inférieurs à 20 grays par heure. Cette influence est par ailleurs fortement atténuée en l'absence d'oxygène.

A ce stade³⁴ l'Andra retient que l'épaisseur du conteneur devra limiter le débit de dose à l'extrados du métal à moins de 10 grays par heure, en tenant compte de la corrosion progressive du métal et de la décroissance radioactive des déchets.

2.4.5 Exigences vis-à-vis des autres phénomènes de corrosion

Le choix des matériaux constitutifs de conteneur et de chemisage de l'alvéole évite un couplage galvanique. L'utilisation de patins durables et inertes³⁵ pour faciliter le glissement des colis dans le chemisage en phase d'exploitation prévient un risque de corrosion cavernueuse au contact conteneur-chemisage (Figure 2.4-3).

Pendant la phase d'exploitation, un risque supplémentaire de corrosion provient du renouvellement d'oxygène par la ventilation des galeries tant que celles-ci ne sont pas fermées : le risque recouvre à la fois une vitesse de corrosion généralisée plus forte en présence d'oxygène qu'en milieu anoxique et une piqûration du métal. La réduction de ce risque relève de la conception de l'alvéole, notamment via l'établissement et le maintien d'un environnement autant que possible anoxique³⁶. Par ailleurs, bien que la corrosion par piqûre puisse se développer à la surface d'un acier non allié en présence d'oxygène, différents travaux montrent une tendance à l'ouverture des piqûres permettant d'atténuer à long terme la profondeur de piqûration devant la corrosion généralisée.

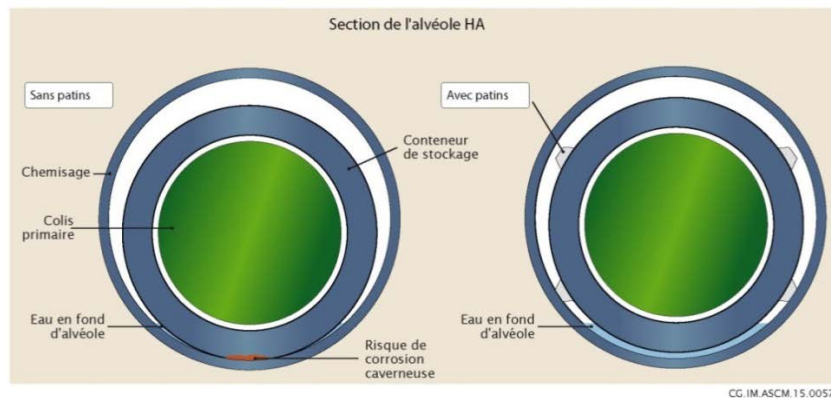


Figure 2.4-3 : Illustration du risque de corrosion par crevasse en cas de contact du conteneur et du chemisage (à gauche) et de la prévention de ce risque par l'interposition de patins inertes (à droite)

2.4.6 Comportement mécanique et évaluation de durabilité du conteneur

Le conteneur est soumis à des contraintes mécaniques auxquelles il doit résister en tenant compte de la perte de métal progressive par corrosion : chargement isotrope de type fluide tant que le chemisage ne se trouve pas au contact du conteneur, puis chargement hétérogène par contact avec le chemisage.

On vérifie que le comportement mécanique du conteneur en prenant en compte la perte de métal par corrosion lui confère une durée d'étanchéité supérieure à la durée de la période thermique définie plus haut (voir le volume III). L'épaisseur minimale nécessaire, à ce stade, pour prévenir la corrosion radiolytique couvre les besoins en résistance mécanique.

³⁴ Cette contrainte de débit de dose pourra être révisée d'ici à la DAC au regard de l'avancée des connaissances sur la corrosion radiolytique.

³⁵ Ces patins sont prévus à ce stade en céramique industrielle.

³⁶ Les évaluations montrent que l'épaisseur de conteneur qui aura déjà été corrodée au moment de la fermeture de Cigéo serait limitée à quelques millimètres au plus.

2.5 Les conteneurs de stockage MA-VL

Il est envisagé d'introduire tout ou partie des colis primaires MA-VL dans des conteneurs de stockage avant leur transfert dans l'installation souterraine pour leur mise en alvéole³⁷. Les fonctions de ces conteneurs relèvent essentiellement de l'exploitation de Cigéo (transferts et manutentions des colis, standardisation des composants de Cigéo...).

2.5.1 Options de conception des conteneurs de stockage MA-VL

La figure, en annexe 4, présente les conteneurs de stockage envisagés pour les déchets MA-VL. Ces conteneurs sont de géométrie parallélépipédique³⁸. Le matériau constitutif est le béton armé pour la majorité des familles (cas des conteneurs de stockage CS1 à CS5) et l'acier pour quelques familles particulières (cas des conteneurs de stockage CS6 et CS7). Les conteneurs en béton sont conçus à ce stade sur la base d'un corps et d'un couvercle préfabriqués. La formulation du béton est adaptée en priorité aux exigences de la phase d'exploitation de Cigéo (cf. DOS-Expl).

2.5.2 Contributions des conteneurs de stockage MA-VL aux fonctions de sûreté après fermeture

Avec les autres bétons présents dans l'alvéole, le béton constitutif des conteneurs de stockage contribue au confinement au plus près des déchets en maintenant un pH basique qui permet :

- de rester dans un domaine de pH où le comportement des déchets bitumineux est connu (voir *supra*) ;
- de favoriser la passivation des déchets métalliques activés, et corollairement de limiter leur corrosion et le relâchement de produits d'activation ;
- de favoriser des faibles valeurs de solubilité des éléments radioactifs telles que le nickel, le cobalt, l'américium, le curium, le neptunium ou le plutonium.

De plus, pour les déchets bitumés, le conteneur favorise le maintien dans le temps d'une géométrie de l'enrobé proche de sa géométrie initiale dans le colis primaire, permettant de mieux bénéficier de la capacité de confinement du bitume (voir *supra*).

L'incorporation dans le béton (son adjuvantation en particulier) de matières organiques ou d'autres substances susceptibles de produire des espèces complexantes est réduite autant que possible, en tenant compte des contraintes techniques et dans la limite du respect des exigences associées à l'exploitation de Cigéo.

Il est à noter que les autres perturbations susceptibles d'être induites par le conteneur sur le système de stockage, particulièrement sur les argilites (présence de vides, actions des produits cimentaires, ferreux, oxydants) sont prises en compte dans l'évaluation de sûreté. Cependant elles ne justifient pas de spécifier des exigences particulières sur la conception du conteneur.

³⁷ A ce stade, les solutions envisagées sont: (i) pour la majorité des familles de colis de déchets, le colis primaire arrivant à Cigéo est placé dans un conteneur de stockage ; (ii) pour quelques familles de colis de déchets dites « éligibles au stockage direct », le colis primaire destiné à Cigéo n'est pas mis en conteneur de stockage et est stocké directement dans l'alvéole de stockage.

³⁸ Cette géométrie tend à limiter les volumes des vides résiduels dans les alvéoles.

3

L'installation Cigéo après fermeture

3.1	<i>L'architecture d'ensemble</i>	142
3.2	<i>Les quartiers et les alvéoles de stockage de déchets HA</i>	149
3.3	<i>Le quartier et les alvéoles de stockage de colis de déchets MA-VL</i>	160
3.4	<i>Les ouvrages de fermeture</i>	172

Outre le Callovo-Oxfordien et les colis de déchets, le système de stockage comprend l'installation souterraine de Cigéo au sein du Callovo-Oxfordien ainsi que les liaisons surface-fond qui traversent les différentes formations géologiques depuis la surface. Ces ouvrages auront été fermés par des bouchons, scellements et remblais, mis en place lors des opérations de fermeture de Cigéo.

La configuration de Cigéo après sa fermeture définitive et plus particulièrement celle de l'installation souterraine intègreront l'ensemble des évolutions d'ici à la fin de la construction et de l'exploitation sur une durée d'ordre séculaire. L'architecture souterraine prise en référence aujourd'hui pour les études constitue une illustration de ce que pourrait être cette architecture en projetant les options techniques retenues au stade de l'avant-projet sommaire (Figure 3.1-1).

Répondant aux fonctions de sûreté et principes de sûreté du Volume I, les zones souterraines de stockage des déchets HAO, HA1/HA2 et MA-VL sont dimensionnées par le nombre de colis à stocker et le dégagement thermique des déchets HA qui doit être suffisamment dissipé dans les argilites. La zone MA-VL constitue un quartier, la zone HAO forme également un quartier et la zone HA1/HA2 est constituée de six quartiers. Leur conception répond à la fois aux exigences sur l'exploitation (cf. DOS-Expl) et à celles définies pour satisfaire les fonctions de sûreté après fermeture.

Des galeries relient les quartiers aux liaisons surface-fond. Le dimensionnement de ces galeries de liaison (nombre et diamètre notamment) répond en premier lieu aux besoins de l'exploitation (construction d'alvéoles de stockage, transfert des colis de déchets, sécurité et sûreté en exploitation (cf. DOS-Expl). La conception des galeries satisfait aussi un ensemble d'exigences en réponse aux fonctions de sûreté et principes de sûreté après fermeture présentés au Volume I.

De même les caractéristiques des liaisons surface fond : nombre et section des puits³⁹, nombre, sections et pentes des descenderies⁴⁰, découlent des besoins de l'exploitation (cf. Volume II du DOS-Expl) et prennent également en compte des exigences en matière de sûreté après fermeture.

Ce chapitre présente les options et exigences de conception sur l'architecture générale souterraine de Cigéo, les quartiers et alvéoles de stockage de déchets HA et MA-VL et les ouvrages de fermeture, en réponse aux fonctions de sûreté après fermeture.

3.1 L'architecture d'ensemble

Vis-à-vis du confinement des radionucléides et des toxiques chimiques après fermeture, l'architecture souterraine d'ensemble de Cigéo apporte des contributions essentielles à « s'opposer à la circulation d'eau » ainsi qu'à « retarder et atténuer la migration des radionucléides et des toxiques chimiques ». Les options de conception et exigences associées sont décrites ci-après et synthétisées au Tableau 3.1-1.

La fonction « limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage » étant réalisée au plus près des déchets, les options et exigences de conception correspondantes concernent spécifiquement chaque quartier de stockage (voir les sections 3.2 et 3.3).

³⁹ La hauteur totale des puits varie de 510 à 550 m. La section est circulaire de diamètre utile variant de 5 à 10 m selon le puits. Le dimensionnement des ouvrages est réalisé à partir des flux transitant sur la durée d'exploitation et de fermeture du stockage.

⁴⁰ Les longueurs des descenderies et leurs pentes (de l'ordre de 10 à 15 %) résultent de la localisation retenue pour les ateliers nucléaires de surface et prennent en compte les contraintes techniques en exploitation (transfert des colis de déchets, évacuation/secours, maintenance, acheminement des matériaux/équipements).

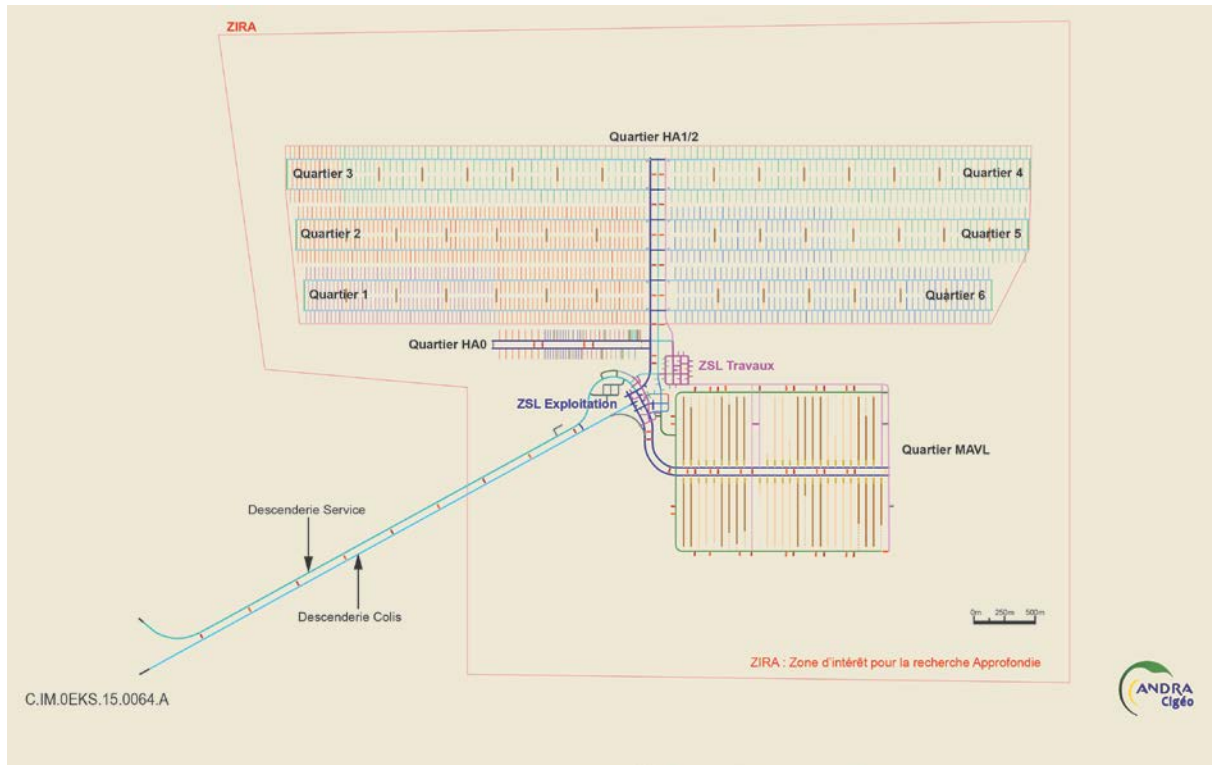


Figure 3.1-1 : Illustration au stade de l'APS de l'architecture souterraine au moment de la fermeture définitive de Cigéo.

3.1.1 Options de conception pour « s'opposer à la circulation d'eau »

La maîtrise des flux d'eau transitant dans le stockage est d'abord assurée par les propriétés du Callovo-Oxfordien, en particulier sa faible perméabilité et son faible gradient de charge vertical (cf. chap. 1).

L'architecture souterraine générale de Cigéo y contribue en limitant la capacité de drainage du stockage et en évitant des configurations d'ouvrages (puits, descenteries, galeries) favorisant les écoulements dans les ouvrages.

Des liaisons surface-fond regroupées

Les puits et la base des descenteries seront regroupés dans une même zone d'emprise restreinte. Une telle option permet d'éviter des configurations susceptibles d'engendrer des « moteurs hydrauliques » (création de gradients de charge préférentiels) de nature à augmenter les circulations d'eau dans les ouvrages (Figure 3.1-2).

Les puits et les descenteries sont positionnés dans une zone où le gradient de charge vertical est très faible (voire nul), ce qui limite encore plus les effets de drain potentiel du stockage par ces ouvrages.

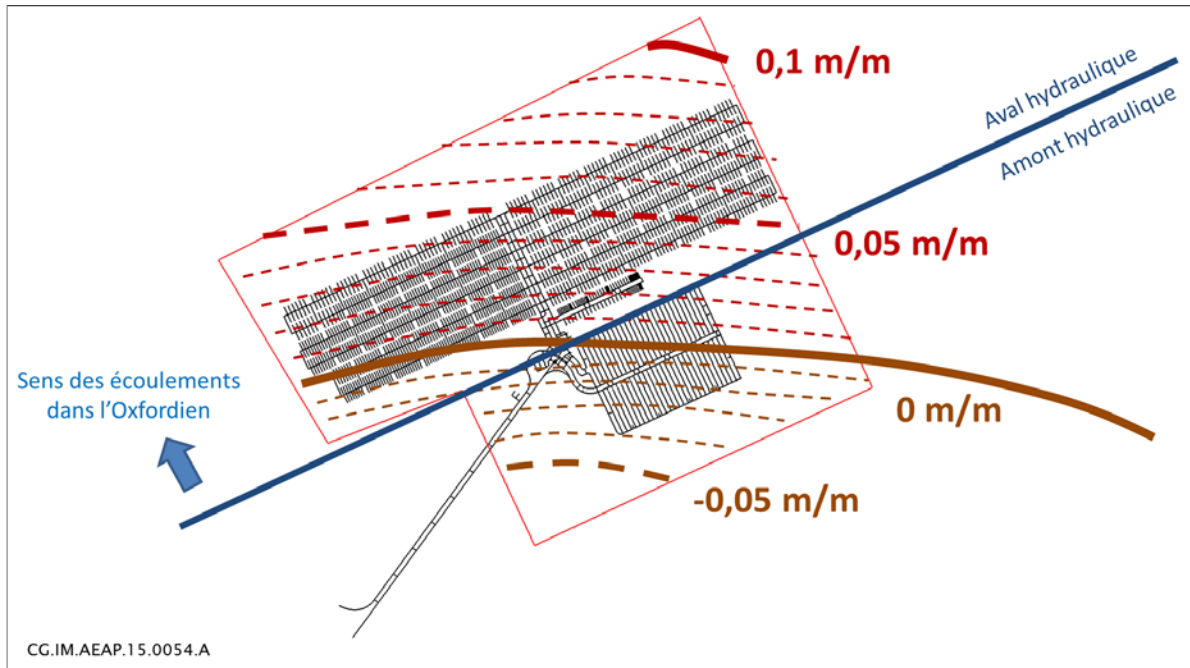


Figure 3.1-2 : Positionnement de l'installation souterraine à terminaison et gradients de charge hydraulique observés dans la ZIRA

Des quartiers de stockage borgnes

Chaque quartier de stockage est borgne par rapport au reste de l'installation souterraine : les accès à chaque quartier de stockage sont peu nombreux et regroupés.

Le flux d'eau drainé vers les liaisons surface-fond dans chaque quartier borgne se limite ainsi à celui qu'il peut échanger avec le Callovo-Oxfordien. La convection au sein de chaque quartier s'en trouve réduite, favorisant la voie de transfert-rétention des solutés par le Callovo-Oxfordien.

3.1.2 Options de conception pour « atténuer et retarder la migration »

Pour retarder et atténuer la migration des radionucléides et toxiques chimiques, deux types de dispositions architecturales sont retenues :

- Des longueurs d'ouvrages mettant à profit la faible vitesse convective dans les quartiers de stockage pour mobiliser préférentiellement la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien plutôt que celle par les ouvrages,
- Des épaisseurs de garde d'argilites aussi grandes que possible au-dessus et en-dessous des ouvrages de stockage, de façon à utiliser au maximum la capacité de confinement du Callovo-Oxfordien.

3.1.2.1 Des caractéristiques géométriques retardant et atténuant le flux longitudinal de radionucléides

A l'intérieur des quartiers de stockage, des alvéoles aussi longs que possibles sont recherchés en tenant compte des contraintes techniques : voir les sections 3.2 et 3.3. De même la longueur de chaque quartier contribue à retarder et atténuer le flux longitudinal de radionucléides vers les galeries de liaison : plus cette longueur est importante, plus la part de solutés sortant des quartiers et atteignant les galeries de liaison principales est faible⁴¹.

⁴¹ Au-delà d'une longueur de 40 m, les colis HA ne « voient » plus l'influence de la galerie.

Il est à noter que les autres paramètres architecturaux, notamment le diamètre des galeries ou leur nombre ont une influence plus modérée sur le transfert des solutés.

Les évaluations menées par l'Andra montrent qu'avec les dispositions adoptées :

- la voie de transfert par les liaisons surface-fond est très nettement inférieure à celle par les argilites du Callovo-Oxfordien, la répartition des flux étant peu sensible à la taille des quartiers et à la longueur des galeries de liaison ;
- l'essentiel de la masse de solutés transférée par les liaisons surface-fond provient des alvéoles situées au plus près.

3.1.2.2 La préservation d'épaisseurs de garde d'argilites pour maximiser le retard et l'atténuation de la migration des radionucléides et toxiques chimiques

Comme indiqué plus haut, la diffusion est le processus de transfert dominant des solutés à travers le Callovo-Oxfordien en lien avec (i) sa faible perméabilité à l'eau, (ii) ses propriétés de diffusion et (iii) les faibles gradients de charge hydraulique en son sein. De ce fait, plus l'épaisseur d'argilites est grande, plus la migration de solutés sera retardée et atténuée.

Des dispositions de conception et plus particulièrement l'organisation des quartiers de stockage dans l'épaisseur du Callovo-Oxfordien cherchent à préserver l'épaisseur d'argilites de part et d'autre des ouvrages de stockage : ces dispositions sont détaillées aux sections 3.2 et 3.3.

Tableau 3.1-1 : Exigences et dispositions de conception relatives à l'architecture générale de l'installation souterraine.

Fonction : S'opposer à la circulation d'eau
Exigences / performance a) Les flux d'eau provenant du Callovo-Oxfordien et drainés par le stockage doivent être limités autant que possible.
Regroupement des liaisons surface-fond Afin de limiter la présence et la formation de voies et vecteurs de migration autre que la diffusion dans la formation hôte : (i) les puits et la base des descenderies seront regroupés dans une même zone d'emprise restreinte, (ii) aucun quartier de stockage ne sera implanté dans la zone délimitée par les bases des liaisons surface-fond.
Borgnitude des quartiers de stockage Chaque quartier du stockage sera borgne par rapport au reste de l'installation souterraine, limitant ainsi le flux drainé à celui qu'il peut échanger avec les argilites.
Orientations des galeries de liaison principales : Les tronçons de galerie où seront placés les scellements seront orientés parallèlement à la contrainte horizontale majeure. Ceci est favorable à la mise en place des scellements qui contribuent également à s'opposer aux circulations d'eau.
Fonction : Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage
Exigences / performance b) Les possibilités d'interaction thermique doivent être réduites. c) Les possibilités d'interaction chimique doivent être réduites et les déchets maintenus dans un environnement phénoménologique maîtrisé.
Il est retenu un stockage dans des quartiers séparés des déchets exothermiques d'une part et des autres déchets d'autre part. A ce stade du projet, une distance minimale de 50 m entre ces deux types de quartier est préservée.
Fonction : Retarder et atténuer la migration des radionucléides
Exigences / performance d) La voie de transfert par le Callovo-Oxfordien doit être mobilisée préférentiellement plutôt que la voie de transfert longitudinale par les ouvrages. e) L'épaisseur de garde entre le stockage et respectivement le toit et le mur du Callovo-Oxfordien conditionne le temps de transfert des radionucléides à travers la formation hôte. Des gardes minimales sont spécifiées.
Les quartiers de stockage (périmètre occupé par les alvéoles et les galeries d'accès) seront conçus de manière à ce que la distance entre le ou les premiers alvéoles du quartier et le ou les alvéoles les plus éloignés de l'entrée du quartier soit aussi grande que possible. À ce stade du projet, une distance minimale de 300 m est retenue.
Pour augmenter la part de radionucléides migrant par le Callovo-Oxfordien (par rétrodiffusion), la longueur des galeries de liaison entre les quartiers dont l'activité en radionucléides mobiles et à vie longue est relativement faible et les liaisons surface-fond, et celle entre les autres quartiers et les liaisons surface-fond sera prise aussi grande que possible. À ce stade du projet, des longueurs minimales de respectivement 300 et 500 m sont retenues.
Pour les alvéoles : l'épaisseur de garde verticale d'argilites saines de part et d'autre des alvéoles de stockage de toutes les catégories de déchets est spécifiée aussi grande que possible en tenant compte des contraintes techniques et des coûts et d'au moins 50 m. La longueur et la pente des alvéoles seront définies de façon à respecter les gardes minimales d'argilites saines. La superposition d'alvéoles sur deux niveaux de stockage est interdite.
Pour les galeries d'accès aux alvéoles MA-VL (contenant notamment les scellements d'alvéoles MA-VL) : l'épaisseur de garde verticale au toit et au mur est au moins égale à l'épaisseur de garde requise au toit et au mur des alvéoles MA-VL de stockage auxquels ces tronçons de galerie donnent accès.
Pour les tronçons de galeries d'accès au sein des quartiers et pour les galeries de liaison en dehors des quartiers de stockage : l'épaisseur de garde verticale de part et d'autre des ouvrages est spécifiée aussi grande que possible en tenant compte des contraintes techniques et des coûts et d'au moins 50 mètres. À l'intérieur des quartiers de stockage, le croisement des galeries s'effectuera à niveau.
La partie de la zone d'implantation de l'installation souterraine où l'épaisseur du Callovo-Oxfordien est la plus importante est préservée pour le développement du stockage au-delà de 2075, en particulier pour le stockage éventuel de combustibles usés.

3.1.3 Maîtrise des perturbations

Certains déchets induisent des perturbations thermiques et chimiques sur le système de stockage. La diversité des déchets conduit à rechercher une indépendance phénoménologique des zones de stockage et, au sein de chaque zone, de certains alvéoles contenant des déchets de natures différentes. Une séparation par des distances de garde horizontales réduit les interactions et leur influence sur le relâchement et la migration des radionucléides, et facilite la modélisation phénoménologique de chaque partie du stockage.

Vis-à-vis des perturbations thermiques induites par les déchets, l'Andra retient pour l'architecture d'ensemble de l'installation souterraine une séparation des colis de déchets selon leur thermicité dans des quartiers dédiés :

- des quartiers dédiés au stockage des déchets HA fortement exothermiques (déchets HA1/2) implantés au nord de la ZIRA ;
- une zone de stockage spécifique aux déchets MA-VL, non ou faiblement exothermiques, au sud-est de la ZIRA ;
- un quartier dédié au stockage des déchets HA moyennement exothermiques (déchets HA0), entre les quartiers HA1-2 et MA-VL.

Cela assure une quasi indépendance thermique (de l'ordre de quelques degrés Celsius au plus) entre les quartiers de déchets exothermiques et ceux où sont stockés les déchets non ou peu exothermiques. La perturbation thermique est particulièrement dimensionnante pour les quartiers HA : les dispositions spécifiques sont détaillées à la section 3.2. Celles concernant le quartier MA-VL sont présentées à la section 3.3.

Les principales perturbations chimiques induites par les déchets sont (i) la perturbation organique due à la dégradation des déchets MA-VL riches en composés organiques et éventuellement aux adjuvants des bétons, et (ii) la perturbation saline due aux déchets MA-VL salins. Les options de conception visant à en réduire l'effet sont présentées à la section 3.3.

D'autres perturbations sont induites par la création et l'exploitation des ouvrages souterrains et par la dégradation des matériaux de construction utilisés (aciers et béton). La vérification des effets limités de ces perturbations sur les fonctions de sûreté après fermeture est traitée dans la suite. La principale perturbation résulte des gaz produits par corrosion anoxique et par radiolyse. Les perturbations oxydante due à la ventilation en exploitation et alcaline due à la dégradation des bétons sont quant à elles principalement limitées au voisinage immédiat des ouvrages, en particulier dans les zones d'argilites endommagées par l'excavation.

3.1.3.1 Perturbations par les gaz produits par corrosion du fer et par radiolyse

L'acier présent dans les colis primaires de déchets, les conteneurs de stockage (acier massif des conteneurs HA et armatures des conteneurs de stockage MA-VL) et les structures ouvragées de l'installation souterraine (chemisage des alvéoles HA ; armatures des revêtements en béton de l'ensemble des galeries et des alvéoles MA-VL...) produit, après la fermeture, de l'hydrogène par corrosion en conditions anoxiques. A ce terme source d'hydrogène s'ajoute la génération de gaz par radiolyse, principalement celle des matières organiques à l'intérieur des déchets MA-VL.

La production de dihydrogène⁴² est estimée de l'ordre de 10^{10} moles réparties à raison de 50 % dans les alvéoles HA, 40 % dans les alvéoles MA-VL et 10 % dans le système de galeries d'accès et de liaison ainsi que dans la zone centrale au pied des liaisons surface-fond. La durée de la production est de plusieurs dizaines de milliers d'années et le flux de production est variable dans le temps en fonction des surfaces d'acier disponibles en ce qui concerne la corrosion et de la décroissance des débits de dose en ce qui concerne la radiolyse.

⁴² Principal gaz produit dans le stockage essentiellement par corrosion des éléments métalliques et par radiolyse de certains déchets MA-VL.

La formation de gaz augmente la durée de la phase « transitoire » non saturée dans le stockage⁴³ : celle-ci peut générer un transport de radionucléides sous forme gazeuse par la voie de transfert gaz ou influencer le transport des radionucléides en solution par la voie de transfert eau.

L'Andra ne retient pas de fonction particulière après fermeture vis-à-vis des gaz, mais vérifie que les performances de confinement de Cigéo sont maintenues malgré cette perturbation. Il s'agit de s'assurer (i) que les gaz n'affectent pas les performances des différents composants du système de stockage, en particulier les gardes d'argilites saines autour des quartiers de stockage (par exemple par fracturation du fait d'une pression de gaz élevée), ainsi que les composants ouvragés contribuant aux fonctions de sûreté et, (ii) que la voie de transport gaz ne met pas le système de stockage en communication avec la biosphère.

Selon les évaluations numériques, en raison (i) des importantes surfaces d'échange offertes au gaz, et (ii) des ouvrages de fermeture qui ne s'opposent pas au passage des gaz⁴⁴, la majeure partie de l'hydrogène produite dans les alvéoles migre à travers la ZFC par convection en phase gaz et par dissolution/diffusion vers les ouvrages, et vers les argilites saines essentiellement par dissolution/diffusion. Les argilites saines sont très peu ou pas désaturées durant le transitoire hydraulique-gaz.

Au cours du transitoire hydraulique-gaz, et hormis dans les zones influencées par la thermique, la pression d'eau dans le stockage ne dépasse que ponctuellement et légèrement la pression d'eau dans le Callovo-Oxfordien à l'équilibre initial (proche de 5 MPa). En d'autres termes, la présence d'hydrogène dissout n'implique pas de surpression importante en eau. Le transitoire hydraulique-gaz ne génère donc pas dans le Callovo-Oxfordien des surpressions de nature à influencer significativement la migration des solutés.

La réactivité de l'hydrogène dissout en particulier avec la pyrite ne modifiera pas significativement la minéralogie du Callovo-Oxfordien et ses conditions redox en grand qui resteront réductrices. Aucun effet significatif de la présence de l'hydrogène dissout n'est donc attendu sur les limites de solubilité (C_{sat}) et les coefficients de distribution (K_d) des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien.

En champ proche des ouvrages, dans les argilites désaturées (essentiellement celles de la ZFC), les coefficients de diffusion des radionucléides diminuent fortement en fonction du degré de saturation selon les mesures qui ont été effectuées avec HTO, I⁻ et Cs⁺.

Nota : L'utilisation de fer est également susceptible d'induire une perturbation chimique sur les argilites, particulièrement dans les alvéoles HA qui concentrent une masse importante d'acier : ce thème est traité à la section 3.2.6.

3.1.3.2 Perturbation oxydante induite durant la phase d'exploitation par l'oxygène de l'air

L'excavation des ouvrages et leur ventilation pendant l'exploitation du stockage entraînent une désaturation des argilites et la pénétration d'oxygène dans ces argilites.

Au sein de ce milieu partiellement saturé, des réactions d'oxydation peuvent modifier localement les conditions géochimiques (modification de la composition de l'eau interstitielle, et des réactions avec certains minéraux dont la pyrite) et provoquer des modifications de la microstructure. Ces réactions se traduisent par une augmentation de la force ionique (au plus d'un facteur 2), une diminution du pH et une augmentation du potentiel redox.

⁴³ Le stockage introduit différentes perturbations hydrauliques marquées, dont les plus significatives sont : (i) la décharge hydraulique, en lien avec l'exploitation du stockage sur une période séculaire, qui se traduit par une baisse de pression dans la formation hôte d'autant plus marquée que l'on se situe à proximité des parois d'ouvrage ; (ii) le maintien d'un état désaturé des ouvrages de stockage du fait de la production de gaz. Le retour progressif aux conditions hydrauliques initiales non perturbées dépend des apports d'eau centripètes par le Callovo-Oxfordien, limités par la faible perméabilité des argilites, et de la perturbation par les gaz. Il peut s'étendre sur plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années.

⁴⁴ Les ouvrages de fermeture permettent le passage des gaz à des pressions faibles (pression d'entrée de gaz dans la ZFC et dans la bentonite, pression de gonflement, de l'ordre de quelques MPa) au regard des contraintes mécaniques in-situ (pas d'altération mécanique).

Les évaluations menées indiquent que la perturbation oxydante reste confinée au sein des argilites endommagées (ZFC).

Ses effets sur les propriétés de transfert, de rétention et de solubilité dans les argilites sont limités, et négligeables à l'échelle du transfert dans le Callovo-Oxfordien, compte tenu :

- de l'extension limitée de cette perturbation ;
- de leur caractère limité pour ce qui est des effets de l'augmentation de la salinité et des transformations minéralogiques ;
- de leur caractère transitoire pour ce qui est de la diminution du pH des eaux interstitielles.

3.1.3.3 Perturbation alcaline induite par la dégradation des bétons

Au droit des liaisons surface-fond, des galeries et des alvéoles MA-VL, le revêtement est constitué de matériaux cimentaires qui génèrent lors de leur dégradation chimique des fluides alcalins.

Les expérimentations et les modélisations numériques de cette perturbation montrent qu'elle se traduit dans les argilites par la formation d'une zone reminéralisée au contact du revêtement correspondant à la dissolution des phases primaires et à la précipitation de phases secondaires, et d'une zone faiblement perturbée caractérisée principalement par la déstabilisation de la phase smectique originelle. Ces perturbations correspondent également à une hausse du pH des eaux interstitielles.

Les évaluations de l'extension de la perturbation alcaline dans les argilites, en conditions saturées, indiquent une borne maximale de quelques dizaines de centimètres pour la zone fortement reminéralisée, et d'ordre métrique pour la zone faiblement perturbée, sur la centaine de milliers d'années. La perturbation reste ainsi confinée au sein des argilites endommagées (ZFC et ZFD) et n'impacte pas le Callovo-Oxfordien sain.

Les incertitudes actuelles sur ces évaluations sont faibles et leur prise en compte va dans le sens d'une diminution d'un phénomène ayant déjà peu d'impact.

L'augmentation de la force ionique due à la perturbation alcaline pourrait augmenter les coefficients de diffusion des radionucléides anioniques et diminuer ceux des cations. Cet effet a été étudié et on dispose de modèle pour sa prise en compte (facteurs correctifs en fonction de la force ionique).

En ce qui concerne les propriétés de rétention et de solubilité :

- dans la zone reminéralisée, des données relatives aux caractéristiques de rétention chimique de certaines phases secondaires avérées sont disponibles.
- dans la zone faiblement perturbée, l'augmentation de la concentration en potassium (K) et de la force ionique peut réduire la rétention (K_d) des alcalins et alcalino-terreux et augmenter les limites de solubilités des radionucléides échangeables si la force ionique est très élevée (supérieure à 4 fois la force ionique des eaux du Callovo-Oxfordien non perturbé). Pour les K_d , ces effets ont été quantifiés et on dispose d'un modèle pour leur prise en compte.

Il est à noter qu'au droit et au contact des futurs scellements, et dans le but de préserver les propriétés des noyaux de scellements, les matériaux cimentaires sont de type bas pH, réduisant la perturbation alcaline (§ 3.4).

3.2 Les quartiers et les alvéoles de stockage de déchets HA

Les alvéoles et quartiers de stockage de déchets HA contribuent à l'ensemble des fonctions de sûreté de Cigéo. A l'instar des conteneurs de stockage, l'Andra a retenu des options de conception sur la base des meilleures techniques disponibles, dans l'optique de contribuer au mieux aux fonctions de sûreté en tenant compte des facteurs techniques, notamment ceux liés à la phase d'exploitation, et économiques. Il est à noter un lien étroit entre la conception des conteneurs de stockage et celle des alvéoles, particulièrement leur chemisage.

On distingue un quartier de stockage de déchets HA0 (déchets moyennement exothermiques) et des quartiers de stockage de déchets HA1 ou HA2 (déchets fortement exothermiques). La conception de

ces quartiers et de leurs alvéoles se différencie par le dégagement thermique modéré des déchets HA0 qui autorise une plus grande densité de stockage, et par le calendrier de mise en stockage : la mise en stockage de déchets HA0 devrait être initiée dès la phase industrielle pilote alors que celle des déchets HA1/HA2 n'interviendra pas avant l'horizon 2075. Cette différence de calendrier permet d'anticiper pour les déchets HA1/HA2 des progrès supplémentaires en matière de connaissances et de démonstrations technologiques, offrant davantage de perspectives d'optimisation dans le cadre du développement incrémental de Cigéo.

Les options et exigences de conception retenues pour les alvéoles et quartiers HA pour contribuer à l'accomplissement des fonctions de sûreté de Cigéo sont présentées ci-après et retranscrites dans le Tableau 3.2-1.

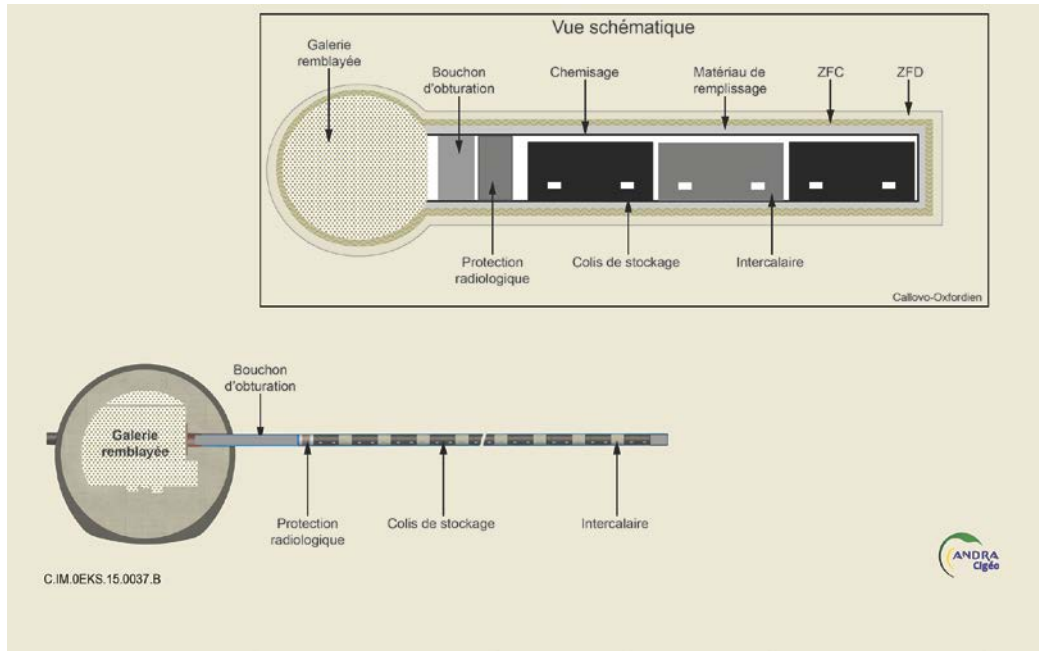


Figure 3.2-1 : Schéma de principe de l'alvéole HA (cas des déchets HA1/HA2)

3.2.1 Options de conception, contribution aux fonctions de sûreté après fermeture

3.2.1.1 Contribution à la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau »

Comme cela a été indiqué plus haut, chaque quartier de stockage HA de Cigéo est borgne par rapport au reste de l'installation souterraine pour limiter les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes via les liaisons surface-fond, après fermeture. Le flux d'eau circulant dans chaque quartier se limite ainsi à celui qu'il peut échanger avec les argilites. Les vitesses d'écoulement d'eau dans le quartier se trouvent ainsi limitées. Les flux ne se cumulent que loin des alvéoles, au niveau des galeries de liaison.

3.2.1.2 Contribution à la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »

Pour mémoire, la limitation du relâchement des radionucléides contenus dans les déchets HA repose en premier lieu sur une faible vitesse d'altération du verre nucléaire. Cette dernière dépend des caractéristiques intrinsèques du verre et des conditions physico-chimiques d'environnement dans l'alvéole HA (en particulier le pH de l'eau et la température à cœur de la matrice vitreuse lors de l'arrivée de l'eau dans les déchets, elle-même fonction de la durabilité de l'étanchéité du conteneur de stockage). Aussi l'Andra conçoit l'alvéole HA de manière à favoriser dans un premier temps la durabilité du conteneur de stockage, puis, après la perte d'étanchéité du conteneur, une faible dissolution du verre ainsi que la précipitation de la majorité des radionucléides.

La protection du conteneur de stockage est obtenue en conférant au chemisage la plus grande durabilité mécanique possible, en tenant compte des incertitudes scientifiques, des limites technologiques et des facteurs économiques : cela permet de retarder autant que possible la mise en contact du chemisage avec le conteneur de stockage. La protection du conteneur consiste aussi à éviter un environnement chimiquement agressif, à la fois pour le conteneur lui-même et pour le chemisage.

A l'instar du conteneur de stockage, le chemisage est réalisé en acier non allié et à bas carbone : il s'agit d'un matériau résistant vis-à-vis des contraintes mécaniques appliquées par les argilites, présentant un mode de corrosion à long terme prédictible (voir *supra*, la section relative au conteneur de stockage) et évitant tout risque de corrosion galvanique entre chemisage et conteneur. La sélection de la nuance d'acier doit être adaptée aux conditions spécifiques de réalisation et de chargement mécanique du chemisage (voir *infra*).

Les observations au Laboratoire souterrain ont montré l'existence d'une perturbation acide transitoire avec l'arrivée d'eau dans les alvéoles en provenance des argilites. Cette perturbation résulte de l'oxydation des pyrites en paroi de l'argilite pendant le creusement des alvéoles. Elle s'atténue dans le temps. Afin de prévenir une accélération de la corrosion du chemisage ainsi que du conteneur, l'espace annulaire entre le chemisage et la roche est occupé par un matériau visant à neutraliser cette perturbation acide transitoire. La formulation du matériau est étudiée pour concilier cet objectif avec celui d'un pH de l'eau venant au contact du verre après la perte d'étanchéité du conteneur qui soit le moins éloigné possible de la neutralité (l'Andra retient en particulier un pH initial du matériau inférieur à 11). L'étude de ce matériau est présentée *infra* (§ 3.2.3).

Par ailleurs, d'autres perturbations chimiques peuvent être générées par la galerie d'accès aux alvéoles. La conception de la tête d'alvéole vise à éviter que ces perturbations n'affectent la durabilité du chemisage et du conteneur, puis l'altération du verre :

- Pendant la période d'exploitation, la tête d'alvéole (sa longueur et un dispositif d'obturation à l'interface alvéole/galerie) réduit les échanges gazeux avec la galerie d'accès, en particulier l'oxygène de l'air de ventilation de la galerie ; cela limite intrinsèquement les phénomènes de corrosion du chemisage et des conteneurs⁴⁵ mais aussi l'oxydation des pyrites des argilites. Un comblement de l'espace annulaire à l'extrados du chemisage à proximité de la tête d'alvéole peut contribuer à diminuer l'accessibilité de l'oxygène dans l'alvéole.
- Après fermeture, la longueur de la tête d'alvéole HA (distance entre la galerie et le premier colis stocké dans l'alvéole) et son remplissage forment un tampon vis-à-vis de l'environnement physico-chimique de la galerie d'accès, et permettent ainsi de se prémunir du risque de propagation/court-circuit du panache alcalin lié à la présence de béton dans le revêtement de la galerie d'accès (voir *infra*, § 3.4.3).

3.2.1.3 Contribution à la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides »

Le choix d'alvéoles horizontaux et de petit diamètre (alvéoles HA), implantés en partie médiane du Callovo-Oxfordien, permet d'optimiser les épaisseurs de garde d'argilites au-dessus et en-dessous pour retarder et atténuer au mieux la migration des radionucléides.

De plus, l'orientation des alvéoles suivant la direction de la contrainte principale majeure horizontale (N155°E) tend à minimiser l'extension verticale de la zone endommagée d'argilites. Cette disposition favorise aussi la construction des alvéoles et la pose de leur chemisage.

Afin de tirer le meilleur parti de la capacité de confinement du Callovo-Oxfordien, les alvéoles sont aussi longs que possible, en tenant compte des facteurs techniques (construction et exploitation) et économiques. Cela réduit la part de radionucléides susceptibles de migrer longitudinalement jusqu'à la galerie d'accès. La longueur de la tête d'alvéole y contribue aussi. Ainsi l'Andra retient une tête d'alvéole de longueur pluri-métrique et une partie utile où sont disposés les colis de stockage de longueur pluri-décamétrique.

⁴⁵ La phase de corrosion généralisée en conditions oxydantes des éléments métalliques est ainsi limitée ; l'occurrence de processus de corrosion localisée par piqûres ou crevasses favorisés par l'oxygène est réduite. Ces phénomènes de corrosion peuvent être associés à des cinétiques de corrosion élevées

3.2.1.4 Préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien

Pour préserver les propriétés favorables des argilites, il convient d'éviter qu'elles ne subissent un échauffement trop important à cause de la chaleur produite par les déchets HA. La hausse de température peut en effet générer des processus couplés complexes pour des températures supérieures à 100 °C dans la roche. En outre, les difficultés expérimentales d'acquisition des connaissances phénoménologiques sont alors nombreuses. Dans la continuité des Dossiers 2005 et 2009, il a été décidé de retenir une température maximale admissible de 100 °C pour les argilites, avec une marge de 10 °C, ce qui conduit à une température maximale de dimensionnement de 90 °C dans les argilites, permettant ainsi de prendre en compte les incertitudes sur les propriétés thermiques et les modélisations thermiques du stockage.

Par ailleurs la température génère au sein des argilites une augmentation de la pression interstitielle⁴⁶. L'Andra a également retenu de dimensionner les quartiers de stockage HA de manière à éviter un risque de fracturation. L'indicateur retenu est la contrainte effective maximale de Terzaghi⁴⁷ (σ_{eff}), en lien avec un comportement en traction avec, comme critères⁴⁸ :

- σ_{eff} (Terzaghi) < 0 en référence ;
- σ_{eff} (Terzaghi) < résistance à la traction de la roche (1,5 MPa), en variante pour les déchets HA1 /HA2.

Enfin l'Andra a retenu de vérifier que l'évolution des températures, à l'échelle du Callovo-Oxfordien et jusqu'au million d'années, ne conduit pas à des transformations minéralogiques irréversibles significatives des argilites. Une température des argilites inférieure à 70 °C au bout de mille ans constitue un premier indicateur⁴⁹.

L'architecture planaire en micro-tunnel des alvéoles HA est particulièrement favorable à la dissipation de la chaleur des déchets HA dans le Callovo-Oxfordien, en tenant compte des facteurs économiques⁵⁰. Le dimensionnement thermique et THM des quartiers HA1/HA2 conduit à espacer les colis de déchets stockés dans les alvéoles pour réduire la densité de charge thermique. Cette disposition n'est pas nécessaire pour les déchets HA0. L'espace entre deux colis de stockage HA1/HA2 est occupé par des intercalaires de géométrie externe similaire à celle du colis de stockage (cf. figure ci-après), permettant de réduire les vides résiduels dans les alvéoles. Les matériaux constitutifs des intercalaires sont définis pour ne pas amener de perturbation physico-chimique dans l'alvéole, en tenant compte de leur dégradation progressive (enveloppe en acier spécifiée essentiellement pour répondre aux besoins de la phase d'exploitation, matériau de remplissage inerte⁵¹).

L'espacement entre les alvéoles au sein d'un quartier est également déterminé pour respecter les critères thermiques et THM ci-dessus.

⁴⁶ L'augmentation de la pression interstitielle dans le Callovo-Oxfordien résulte de sa faible perméabilité et de la différence de dilation thermique entre l'eau porale et les phases solides des argilites. Suivant les niveaux de pression interstitielle et de contraintes atteints, ainsi que le chemin de chargement suivi (extension, cisaillement ...), la combinaison de ces deux augmentations peut conduire à un endommagement des argilites diffus et/ou localisé (fracturation/rupture).

⁴⁷ Convention de signe : Une contrainte de compression est négative, une contrainte de traction positive.

⁴⁸ L'approche prudente adoptée par l'Andra à ce stade consiste en la vérification de l'atteinte ou non de critères de rupture en post-traitement des calculs élastiques. La redistribution des contraintes et la diminution de la pression interstitielle dues à l'initiation de la plasticité ou de l'endommagement avant la rupture ne sont pas représentées.

⁴⁹ Une incursion dans un domaine de fonctionnement thermique plus élevé en termes de couple 26 Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Version consolidée au 28 octobre 2015. (2015). , 27 Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Etat de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base des indicateurs de durabilité. (2004). Association Française de Génie Civil, Documents scientifiques et techniques. 252 p. pourra faire l'objet d'évaluation au cas par cas.

⁵⁰ En comparaison d'autres concepts comme des puits verticaux, cette architecture minimise les volumes de roche à excaver, à critères de dimensionnement thermique identiques.

⁵¹ Par exemple un sable sec.

Les essais thermiques menés au Laboratoire souterrain à échelle réduite et à échelle 1 ont démontré la maîtrise de la dissipation de la chaleur dans le Callovo-Oxfordien (transfert de chaleur dominant par diffusion) et la validité des modèles et des outils de simulation pour le dimensionnement thermique de Cigéo.

Sur ces bases, le quartier HA0 comprend au stade de l'avant-projet sommaire environ 75 alvéoles de longueur 80 m et les quartiers HA1/HA2 comprennent au total environ 1 465 alvéoles de longueur 100 m. Le dimensionnement thermique sera mis à jour en phase d'avant-projet définitif.

La Figure 3.2-3 ci-dessous montre l'évolution de la température dans les argilites au droit de l'alvéole de stockage de déchets HA2 le plus chaud, avec le dimensionnement actuel. On notera ici que le critère dimensionnant est le critère THM et non le critère de température maximal de 90 °C dans les argilites.

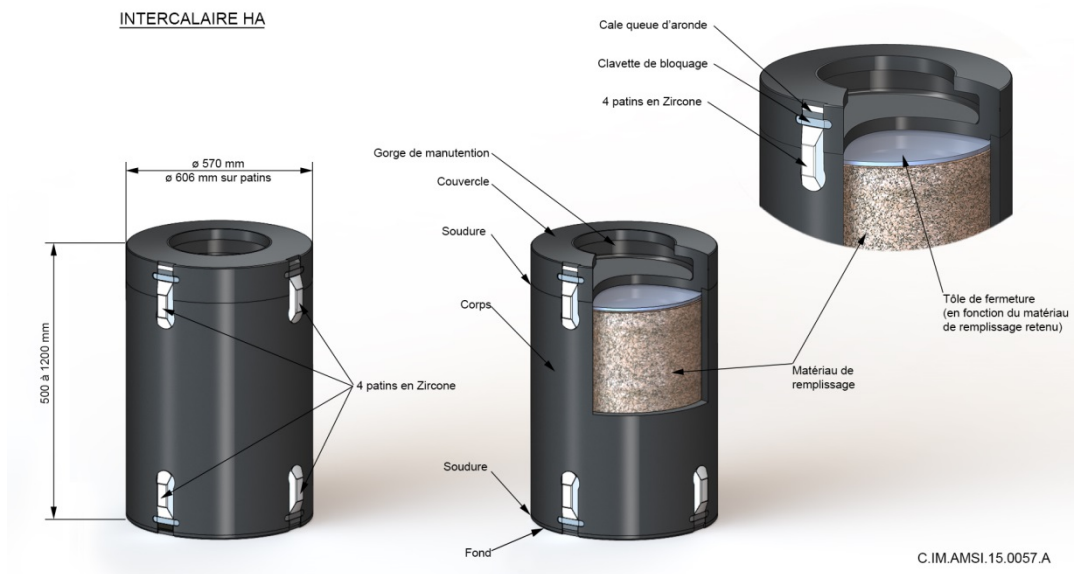
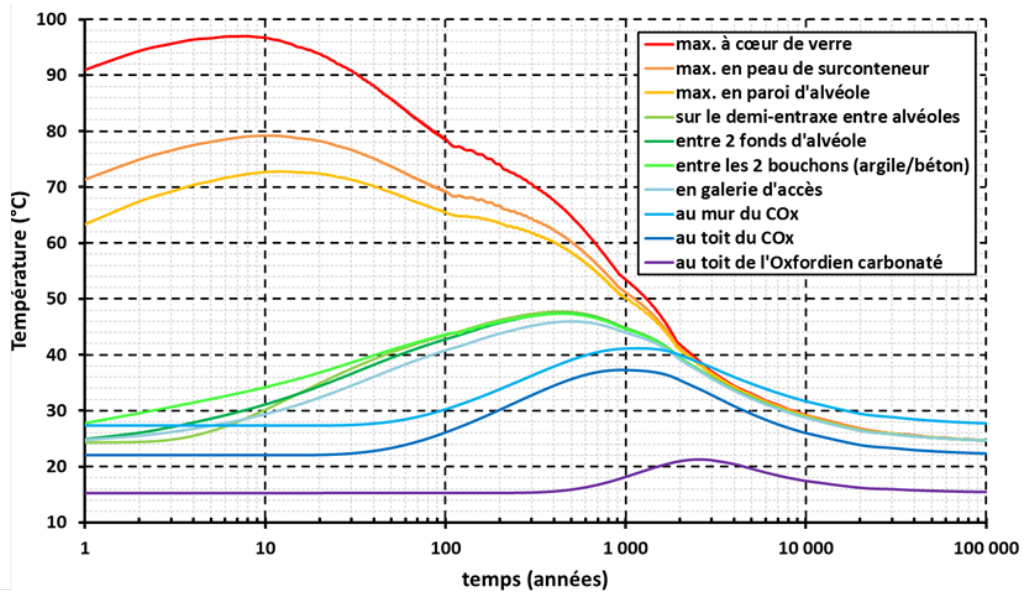


Figure 3.2-2 : illustration d'intercalaire HA pour mise en alvéole HA1/HA2



CG.IM.AEAP.15.0051.A

Figure 3.2-3 : Evolutions temporelles de la température en différents points dans et autour de l'alvéole HA2 le plus chaud (l'évolution de la température dans les argilites en paroi est donnée par la courbe jaune)

Tableau 3.2-1 : Fonctions de sûreté, exigences et options de conception associées à l'alvéole HA

Exigences / performance	Dispositions de conception	Composant
Un environnement physico-chimique favorable à la protection des colis de déchets	L'emploi de matériaux cimentaires à proximité des colis sera limité autant que possible.	Tête d'alvéole HA
	L'espace intérieur des têtes d'alvéole HA, à proximité des colis, sera rempli de manière homogène par un matériau argileux avec un pH proche de la neutralité (cf. les ouvrages de fermeture).	Tête d'alvéole HA
	La conception de la tête d'alvéole HA (notamment sa longueur) visera à favoriser le maintien de conditions anoxiques dans la partie utile de l'alvéole HA en phase d'exploitation.	Tête d'alvéole HA
	L'espace annulaire initial entre l'extrados du chemisage et le milieu géologique sera comblé par un matériau de remplissage. Le matériau utilisé et le procédé de mise en œuvre viseront : > à réaliser un effet de neutralisation vis-à-vis de la perturbation acide transitoire induite par l'oxydation des pyrites en paroi de l'argilite. > à limiter autant que possible les perturbations chimiques induites sur le verre nucléaire et sur la mobilité des radionucléides dissous (après perte d'étanchéité du conteneur de stockage). > à réduire, au niveau de la tête d'alvéole, l'accessibilité de l'alvéole HA à l'oxygène provenant de la ventilation de la galerie d'accès.	Matériau de remplissage

Exigences / performance	Dispositions de conception	Composant
Le risque de corrosion cavernueuse devra être évité au contact entre le conteneur de stockage et le chemisage, ainsi qu'entre conteneurs de stockage juxtaposés, le cas échéant	Interposition d'un matériau inerte vis-à-vis de la corrosion (patins en céramique industrielle également destinés à faciliter le glissement des colis dans le chemisage).	Patins
Le risque de couplage galvanique entre le chemisage et la surface externe du conteneur de stockage devra être évité.	Sélection des matériaux métalliques de conteneur et de chemisage.	Conteneur de stockage HA Chemisage
Les effets significatifs de corrosion radiolytique doivent être évités.	L'épaisseur du conteneur de stockage sera telle que le débit d'équivalent de dose (DeD) au pseudo contact (5 centimètres), à l'interface métal-produits de corrosion, reste faible et en tout état de cause inférieur ou égal à la contrainte de 10 Gy/h.	Conteneur de stockage HA
La présence d'impuretés, les risques de corrosion localisée, la taille des défauts internes et les risques de fragilisation par l'hydrogène doivent être minimisés.	Procédés de fabrication du chemisage et des conteneurs de stockage HA.	Conteneur de stockage HA Chemisage
Le risque de corrosion sous contrainte des aciers utilisés pour constituer le conteneur et le chemisage doit être réduit.	La conception d'ensemble de l'alvéole HA de stockage vise à maintenir aussi longtemps que possible un fonctionnement mécanique du conteneur de stockage et autant que possible du chemisage dans le domaine élastique : > Par le dimensionnement du chemisage. > Par les nuances et microstructures des aciers sélectionnées pour leur sensibilité aussi faible que possible à la corrosion sous contrainte et pour leur limite élastique élevée.	Conteneur de stockage HA Chemisage
Préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien		
Les déformations différées des argilites après rupture du chemisage doivent être limitées.	Le volume des vides résiduels dans les alvéoles après obturation sera faible et régulièrement distribué le long de l'alvéole. Dans le cas des alvéoles HA de colis de déchets fortement exothermiques HA1/2, les vides entre les colis de déchets sont occupés par des intercalaires.	Colis de stockage HA Intercalaires
La température dans le stockage doit rester dans un domaine où les phénomènes sont maîtrisés : la température maximale des argilites doit rester toujours inférieure à 100 °C (pour tenir compte des incertitudes, une marge de 10 °C est adoptée). L'augmentation de la pression interstitielle dans les argilites ne doit pas entraîner un risque de fracturation. Les transformations minéralogiques significatives et irréversibles des argilites doivent être évitées.	Dimensionnement thermique du quartier et des alvéoles HA.	Quartier et alvéoles HA

3.2.2 Retour d'expérience

Les options de conception de l'alvéole HA s'appuient sur le retour d'expérience de l'Andra notamment au travers des nombreux essais de démonstration réalisés au Laboratoire souterrain (Figure 3.2-4) :

- qui ont montré la faisabilité (i) de réalisation d'alvéoles HA dans le Callovo-Oxfordien de longueur pluri-décamétrique (jusqu'à 100 m) avec une rectitude suffisante de l'ouvrage vis-à-vis des opérations de tubage à l'avancement et de celles de mise en place et de retrait éventuel des colis et, (ii) de mise en place d'un chemisage métallique constitué de tronçons de 20 mm d'épaisseur et 2 m de longueur.
- qui ont permis d'évaluer la zone endommagée d'argilites autour d'un alvéole HA (structuration et extension) et le comportement mécanique d'un chemisage soumis au chargement par les argilites sur plusieurs années.

Ces essais de démonstrations ont été complétés par des essais en forage permettant d'appréhender le chargement anisotrope d'un chemisage du fait de l'anisotropie de la zone endommagée et le comportement en flexion du chemisage (ovalisation). Enfin, un essai d'injection de l'annulaire chemisage-argilites a été conduit au Laboratoire souterrain sur une longueur plus faible.



Figure 3.2-4 : Alvéole HA - Démonstrateurs au Laboratoire souterrain

Des essais sont programmés notamment sur le comportement du chemisage, les interactions entre les différents matériaux (Plan de développement des composants de Cigéo). Les résultats seront intégrés dans le rapport de sûreté qui servira de support à la demande d'autorisation de création.

Des études et essais sont aussi programmés au-delà, avant puis après la mise en service de Cigéo, dans l'objectif d'une part de consolider les acquis et d'autre part d'optimiser les solutions techniques. Des essais de mise au point et de qualification d'alvéole HA de longueur augmentée (150 m) seront ainsi réalisés dans l'optique de consolider cette voie d'opportunité en vue de la réception de déchets HA1/HA2. Ces résultats s'ajouteront au retour d'expérience de l'observation des alvéoles HA0 (mis en œuvre dans le cadre de la phase industrielle pilote) pour optimiser la conception et nourrir la démonstration de performance des futurs alvéoles de stockage de déchets HA.

L'option de conception retenue à ce stade est fondée sur le retour d'expérience du Laboratoire souterrain, et s'inscrit dans une démarche progressive pour le dimensionnement de l'alvéole HA, qui comportera notamment :

- la validation du concept de stockage en phase industrielle pilote avec des alvéoles de 80 m de longueur pour les déchets moyennement exothermiques (HA0),
- l'allongement des alvéoles (100 m) pour le stockage des déchets fortement exothermiques HA1/HA2 qui sera mis en œuvre au-delà de 2075.
- une optimisation consistant à porter la longueur des alvéoles HA1/HA2 de 100 m à 150 m, sous réserve d'une démonstration de faisabilité.

Des solutions évolutives répondant à des fonctionnalités identiques sont à l'étude. Elles pourront notamment s'appuyer sur une conception avec des composants non métalliques ou avec d'autres dispositions permettant de limiter la corrosion.

3.2.3 Impact de la température sur le retard et l'atténuation de la migration des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien

Les effets de la température sur les conditions de transfert et de rétention ont été largement étudiés depuis de nombreuses années :

- sur la composition chimique de l'eau des eaux du Callovo-Oxfordien, les modélisations montrent que l'effet des températures se traduit essentiellement par une évolution du pH, du Eh et de la concentration en Al et Si, les autres paramètres majeurs restant quasi invariants ;
- sur la solubilité, des mesures ont été effectuées à 25°C et 60°C sur quelques familles de radionucléides ; les résultats indiquent une augmentation de la solubilité avec la température, d'un facteur 2 à 5 pour la plupart des radionucléides ; au-delà de cette température, les incertitudes sont importantes ;

- sur les coefficients de partage solide-solution (Kd) dans les argilites du Callovo-Oxfordien, l'influence de la température a également été évaluée sur une gamme de température de 20 à 80 °C pour plusieurs radionucléides (Cs, Ni, Eu, Se(IV)) ; il en résulte qu'une élévation de température conduit à une diminution de la rétention des radionucléides sensibles à l'échange d'ions (au plus d'un facteur 10 aux températures attendues), et une augmentation de la rétention des radionucléides qui agissent par complexation de surface ; l'interprétation des résultats a également permis de définir des facteurs correctifs des coefficients de partage en fonction de la température ;
- sur les propriétés de diffusion des radionucléides dans les argilites du Callovo-Oxfordien, les essais de through-diffusion réalisés à 20°C, 50°C, 80°C et 90°C montrent que ces effets correspondent à l'influence de la température sur la mobilité des traceurs dans l'eau, et que la porosité accessible n'est pas impactée, de plus cet effet est réversible ; les mesures effectuées ont permis la définition de facteurs correctifs des coefficients de diffusion en fonction de la température ; les incertitudes sur ces facteurs sont limitées à 10% ;
- sur la perméabilité, l'effet est déterminé par la viscosité, qui diminue au plus d'un facteur 2 ou 3 aux températures les plus élevées.

Le transitoire thermique peut également provoquer des mouvements d'eau (thermo-hydraulique et thermo-osmotique) et un transfert de soluté (thermo-diffusif). Toutefois les connaissances acquises sur ces phénomènes montrent qu'ils restent largement négligeables devant la diffusion.

L'état des connaissances sur l'influence de la température sur les propriétés hydro-dispersives du Callovo-Oxfordien permet de conclure à un effet global négligeable sur le transfert des radionucléides au regard (i) des températures atteintes limitées par conception et qui renvoient à des effets limités, (ii) de la durée du transitoire d'élévation thermique (quelques centaines d'années) très inférieure de plusieurs ordres de grandeur au temps de transfert des radionucléides dans les argilites (quelques centaines de milliers d'années).

3.2.4 Exigences particulières vis-à-vis du chemisage

3.2.4.1 Exigences vis-à-vis de la corrosion sous contrainte (CSC)

Comme pour le conteneur de stockage, le phénomène de corrosion sous-contrainte (CSC) peut apparaître sous l'action conjuguée d'une contrainte mécanique de traction et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, notamment la présence de dihydrogène (fragilisation).

Pour réduire le risque de CSC, l'Andra retient pour le choix de l'acier du chemisage et de son épaisseur⁵² les critères suivants⁵³ :

- une limite d'élasticité élevée ;
- une sensibilité aussi faible que possible à la CSC ;
- une limitation des contraintes dans le chemisage, dans l'optique de rester autant que possible inférieur à 2/3 de sa limite d'élasticité en traction, en tenant compte des facteurs techniques.

3.2.4.2 Autres exigences vis-à-vis de la corrosion

Comme indiqué plus haut, le risque de corrosion cavernueuse doit être évité au contact du chemisage et des colis de stockage (§ 2.4.5). De même le choix des techniques de jonctions des tronçons de chemisage doit réduire ce risque au niveau de ces jonctions. Par ailleurs la limitation de l'accessibilité à l'oxygène dans l'alvéole contribue également à limiter ce phénomène.

Pour mémoire, le choix des aciers du chemisage et du conteneur réduit le risque de couplage galvanique.

⁵² La masse du chemisage est limitée par les possibilités techniques de mise en place dans l'alvéole.

⁵³ L'acier pétrolier API 5L X65 répond *a priori* à ces exigences. En particulier il est aujourd'hui établi que tant que les contraintes mécaniques qui s'exercent sur ce type d'acier restent inférieures à 2/3 de la limite élastique, il n'est pas susceptible à la CSC (il subsiste des incertitudes au-delà de cette limite). Des essais complémentaires sont prévus, notamment en milieu alcalin sur des échantillons de chemisage pour évaluer l'influence de l'alcalinisation initiale du milieu par le matériau de remplissage sur l'occurrence de la corrosion sous contrainte, sachant que cette alcalinisation est a priori favorable dans un milieu anoxique.

3.2.5 Exigences et performances particulières vis-à-vis du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage

Les analyses préliminaires montrent que pour neutraliser le transitoire acide et constituer un environnement favorable à la passivité des aciers du chemisage et des conteneurs, le matériau de remplissage doit avoir une charge alcaline suffisante. *A contrario*, pour respecter les exigences vis-à-vis des déchets, il doit être autant que possible faiblement alcalin pour conduire à un pH inférieur à 10 lors de l'arrivée de l'eau au contact du verre nucléaire.

Au stade actuel des études et des éléments expérimentaux disponibles, la formulation du matériau de remplissage satisfaisant précisément ces deux exigences n'est pas encore définie, en lien principalement avec les incertitudes sur la durée et l'importance du transitoire acide. La stratégie adoptée par l'Andra est à ce stade de définir une formulation dite « méthodologique » pour, d'une part accompagner l'acquisition de nouvelles connaissances sur le comportement du matériau et de son environnement en situation de stockage, d'autre part conduire les essais.

Une formulation méthodologique du matériau de remplissage

Il s'agit d'une formulation de référence consistant en un assemblage ciment-bentonitique⁵⁴ (clinker / ajout hydraulique / ajout pouzzolanique / argile / fluidifiant minéral), et autour de laquelle différentes variantes peuvent être établies.

Elle intègre les exigences vis-à-vis de la mobilité des radionucléides (absence d'adjuvants organiques).

La capacité de la formulation de référence à neutraliser le transitoire acide est établie sous certaines hypothèses notamment le niveau d'oxydation des pyrites des argilites qui détermine le niveau d'alcalinité initial nécessaire.

La formulation méthodologique offre des marges de manœuvres vis-à-vis des exigences sur le matériau de remplissage, en faisant varier les proportions des différents constituants, certains permettant d'augmenter le pH, d'autres de le diminuer. Les constituants clés ainsi que leur impact sur le pH final sont illustrés sur la figure ci-dessous.

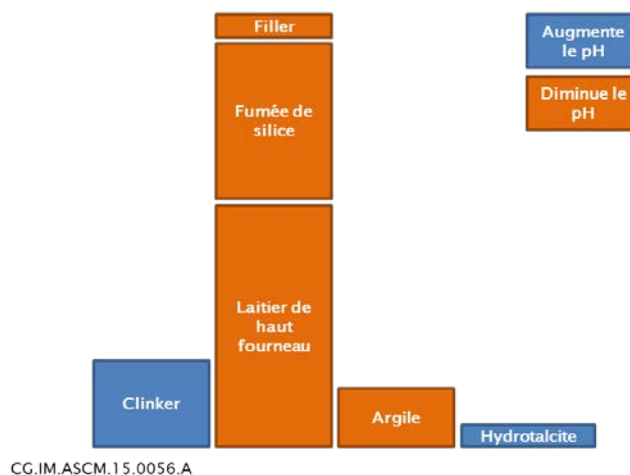


Figure 3.2-5 : Représentation schématique de l'impact des constituants du matériau sur le pH final. La hauteur du rectangle donne un ordre de grandeur de la proportion du composant dans le matériau

⁵⁴ Les matières premières sont toutes industriellement disponibles et ne présentent pas de difficulté d'approvisionnement. Un protocole de réalisation a été mis au point et des premières caractérisations réalisées. Un premier essai de préparation à l'échelle pilote (100 l reproduit 3 fois) de pompage et d'injection a notamment été réalisé avec succès.

Partant de la formulation méthodologique, un ensemble d'essais en laboratoire de surface et en Laboratoire souterrain ainsi que des simulations numériques sont programmés dans le cadre du Plan de développement des composants de Cigéo (PDD)(28), pour :

- disposer d'une gamme de matériaux répondant aux exigences en matière de propriétés chimiques, tant vers des milieux moins alcalins que vers des matériaux plus alcalins ;
- caractériser les différentes formulations à l'état frais et à l'état durci, dans le but de disposer d'un modèle de comportement reliant la formulation à des paramètres physiques et chimiques : perméabilité à l'oxygène, résistance à la compression, ... ;
- décrire l'évolution du matériau de remplissage au cours du temps compte tenu (i) de son état initial, (ii) de la sollicitation thermique et (iii) des différents couplages physico-chimiques auxquels il peut être soumis dans le contexte d'alvéole HA. Le suivi des propriétés mécaniques et de transfert du matériau de remplissage ainsi que des évolutions des matériaux à son contact ou des fluides l'ayant traversé sera également réalisée.

Parallèlement, de nouvelles connaissances seront acquises sur l'oxydation des argilites et ses effets sur la chimie des eaux porales du Callovo-Oxfordien (pH, Eh, concentration en éléments majeurs), notamment en température, à travers une approche alliant essais en laboratoire de surface, expérimentation in situ et modélisation géochimiques. Les actions associées visent à réduire en particulier les incertitudes sur le transitoire acide.

À terme, le domaine de fonctionnement du matériau de remplissage en lien avec les exigences vis-à-vis des matériaux métalliques et vis-à-vis du verre sera défini avec plus de précision. De même, des éléments seront disponibles pour mieux apprécier les contributions éventuelles du matériau de remplissage sur le plan mécanique et en termes de limitation de l'apport d'oxygène à proximité de la galerie d'accès (Cf. Tableau 3.2-1).

Une mise en place du matériau de remplissage faisable sur le plan technologique

Des tests au Laboratoire souterrain ont démontré la faisabilité de la mise en place du matériau de remplissage sur une longueur de 40 m. L'homogénéité globale du matériau de remplissage a été contrôlée dans certaines zones à l'extrados du chemisage : aucune discontinuité importante du matériau n'a été relevée. L'injection d'un matériau de remplissage de type ciment-bentonitique de manière homogène sur l'alvéole HA de plus grande longueur est faisable sur le plan technologique notamment par injection à partir du fond de l'alvéole juste après le creusement de celui-ci. Il s'agit en effet de techniques couramment mises en œuvre dans l'industrie, notamment pétrolière.

Dans le cadre du PDD (28), il sera notamment vérifié que la gamme de matériaux dont on dispose, et qui répondent essentiellement aux exigences en matière de propriétés chimiques, permettent d'aboutir à des matériaux qu'il est possible d'injecter à l'échelle 1. Pour ce faire, quatre tests d'injection au Laboratoire souterrain, *a minima* d'une des formulations, sont prévus.

3.2.6 Maîtrise des interactions fer/argilites

Les conteneurs de stockage et le chemisage des alvéoles HA constituent une quantité importante d'acier, impliquant de vérifier le caractère limité de l'impact du fer sur les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien.

Les interactions fer/argile au droit des alvéoles HA sont bien maîtrisées expérimentalement. Elles correspondent à la formation de différents composés secondaires : des oxydes de fer, des carbonates de fer, des silicates et aluminosilicates de fer, des sulfures et des argiles néoformées enrichies en fer. Il se forme également de l'hydrogène dont une partie se trouve dissoute en phase aqueuse.

Les simulations géochimie-transport indiquent, à la fin de la période de corrosion, une zone reminéralisée d'extension pluri centimétrique à décimétrique au niveau de l'interface fer-argilite initiale et une zone faiblement perturbée d'ordre métrique dans le Callovo-Oxfordien. Ce sont donc les argilites en champ proche au droit des alvéoles HA qui sont concernées par cette perturbation.

Au vu de sa faible extension, cette perturbation a un impact négligeable sur le transfert des radionucléides dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien.

3.3 Le quartier et les alvéoles de stockage de colis de déchets MA-VL

3.3.1 Options de conception

Les alvéoles de stockage MA-VL sont des tunnels orientés suivant la direction de la contrainte principale majeure.

Ils sont constitués d'une tête d'alvéole, d'une partie utile accueillant les colis de stockage de déchets MA-VL et d'une partie en fond d'alvéole⁵⁵.

La longueur de la partie utile de l'alvéole MA-VL est d'environ 500 m.

La Figure 3.3-1 illustre le schéma de principe retenu pour l'alvéole MA-VL en phase après fermeture.

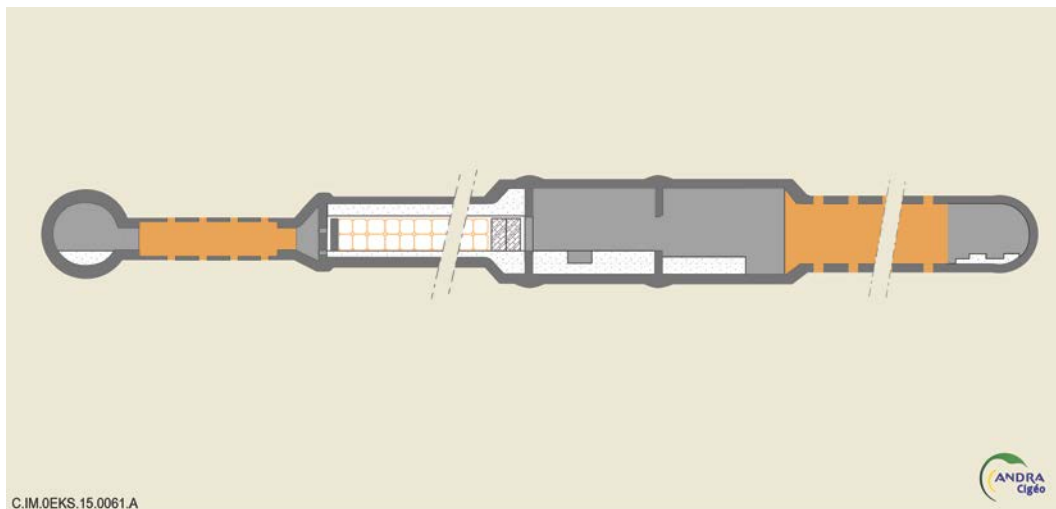


Figure 3.3-1 : Illustration d'un alvéole MA-VL après fermeture -

La section courante de la partie utile dépend des types de colis stockés. Les alvéoles de stockage comprennent des agencements de colis⁵⁶ sur 1 à 2-3 colonnes/niveaux avec des sections excavées de 17 à 65-70 m². Le dimensionnement s'appuie sur le retour d'expérience disponible (cf. § 3.3.3). La Figure 3.3-2 illustre l'arrangement envisagé pour l'une des typologies de colis de stockage.

Une section de 110 m² est étudiée en variante dans une optique d'optimisation. Elle fera l'objet d'un démonstrateur pendant la phase industrielle pilote avant d'être mise en œuvre industriellement.

⁵⁵ La partie fond est réservée à la sortie d'air de ventilation (local de filtration) pour répondre à une fonction de sûreté en exploitation (cf. Volume II et III du DOS-EXpl)

⁵⁶ Le chapitre 3 du Volume II du DOS-EXpl précise les différents agencements.



Figure 3.3-2 : Illustration d'arrangement de colis de stockage dans un alvéole MA-VL

La réalisation de l'alvéole MA-VL s'accompagne de la pose de boulons et d'un revêtement en béton pour assurer la stabilité mécanique *a minima* jusqu'à la fermeture. Un béton de remplissage délimite une section de stockage rectangulaire adaptée au volume occupé par les colis de déchets.

Au stade de l'avant-projet sommaire, l'ensemble des alvéoles MA-VL sont regroupés dans un quartier unique (Figure 3.3-3). Les dimensions du quartier résultent :

- du nombre d'alvéoles de stockage MA-VL nécessaires à l'accueil des colis de déchets MA-VL inventoriés, à savoir environ 50 au stade de l'APS. Ce nombre est lié notamment aux possibilités de co-stockage de familles différentes dans un même alvéole (voir *infra*) et à l'alternative entre la mise en conteneur de stockage des colis primaires et le stockage direct de certains colis primaires (Cf. Chapitre 2) ;
- de la distance ménagée entre alvéoles adjacents ; un entraxe correspondant à cinq diamètres d'alvéole est retenu pour assurer une indépendance mécanique entre ouvrages⁵⁷. Ce point fera l'objet d'études en APD visant à diminuer cette distance dans la mesure du possible, sachant que la distance minimale pour respecter les exigences en matière d'interaction physico-chimique entre des alvéoles contenant des sels ou susceptibles de générer des espèces complexantes et les autres alvéoles est de 30 mètres (voir *infra*) ;
- du réseau de galeries d'accès et de retour d'air ; des galeries d'accès « bitubes » sont définies pour réduire les risques en exploitation et offrir plus de flexibilité sur la gestion de l'installation.

La figure ci-après illustre le quartier MA-VL au stade de l'avant-projet sommaire.

⁵⁷ La stabilité mécanique de chaque ouvrage pris individuellement permet alors d'assurer la stabilité d'ensemble du quartier.

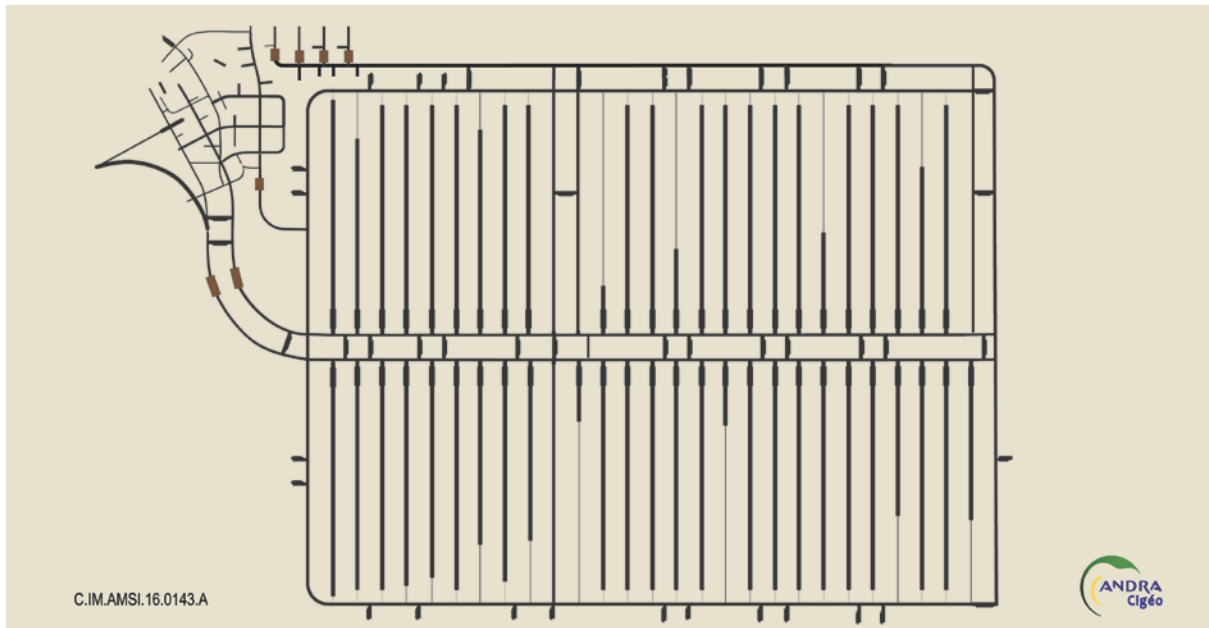


Figure 3.3-3 : Illustration du quartier MA-VL à terminaison

Un objectif d'optimisation du quartier et des alvéoles MA-VL est étudié dans le cadre d'une densification du stockage ; celle-ci correspond à une diminution du nombre d'alvéoles, par modification de l'agencement des colis en augmentant le nombre de colonnes et de niveaux de 1 à 3-4 colonnes/niveaux.

Les sections excavées associées à cette densification sont de l'ordre de 30 à 110 m².

Le respect des différents critères cités précédemment devra être justifié pour ces configurations d'alvéoles.

3.3.2 Contribution aux fonctions de sûreté après fermeture

Les exigences et les dispositions de conception retenues pour l'accomplissement de ces fonctions sont retranscrites dans le Tableau 3.3-1.

3.3.2.1 Contribution à la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau »

A l'instar des autres quartiers de stockage, le quartier de stockage MA-VL est borgne par rapport au reste de l'installation souterraine pour limiter les flux d'eau entre les ouvrages de l'installation souterraine et les formations sus-jacentes du Callovo-Oxfordien via les liaisons surface-fond.

3.3.2.2 Contribution à la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »

L'alvéole MA-VL contribue à limiter le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques et à les immobiliser dans le stockage en imposant un environnement chimique cimentaire⁵⁸.

⁵⁸ Les matériaux cimentaires des alvéoles MA-VL assurent des conditions de pH élevées sur des durées supérieures à 100 000 ans. Puis la dégradation des bétons conduit à une diminution progressive des valeurs de pH jusqu'à des valeurs qui restent supérieures à 10,5 sur le million d'années.

Outre les effets favorables à la limitation des cinétiques de relâchement des radionucléides par les déchets métalliques activés et par les colis de déchets bituminés ($\text{pH} > 11$ pour les déchets métalliques ; $7 \leq \text{pH} \leq 12,5$ pour les enrobés bitumineux⁵⁹ ; voir la section 2.3), l'environnement cimentaire limite le transfert des radionucléides, en particulier des actinides, vers le Callovo-Oxfordien en favorisant leur précipitation et leur rétention.

L'important corpus de données acquises depuis de nombreuses années sur la caractérisation des propriétés des matériaux cimentaires vis-à-vis de la spéciation met en évidence, pour les états physico-chimiques des bétons⁶⁰:

- une faible solubilité des actinides : les valeurs reposent à la fois sur de nombreuses connaissances acquises sur des calculs d'équilibre, des mesures apparentes effectuées dans les solutions cimentaires et sur des données de la littérature lorsque ces dernières sont jugées pertinentes vis-à-vis des compositions d'eaux cimentaires et des protocoles de mesure ;
- des propriétés de sorption significatives des phases cimentaires : les valeurs reposent sur des mesures directes, des modèles calibrés pour un matériau d'intérêt (sur matériau ou suivant une approche « top-down ») et des modèles développés à partir de données issues de systèmes simples, tels que les silicates de calcium hydratés (CSH) (suivant une approche d'additivité des composants, ou « bottom-up »).

Par ailleurs, pour limiter la mobilité des radionucléides et des toxiques chimiques dans le système de stockage, une exigence⁶¹ porte sur la séparation entre les colis de déchets MA-VL susceptibles de générer des perturbations chimiques, notamment des espèces complexantes issues de la dégradation de matières organiques, et les autres colis de déchets. Ainsi, une distance minimale de 30 m sépare les alvéoles MA-VL contenant des types de déchets différents susceptibles d'interagir négativement.

La température à l'intérieur des alvéoles MA-VL est limitée :

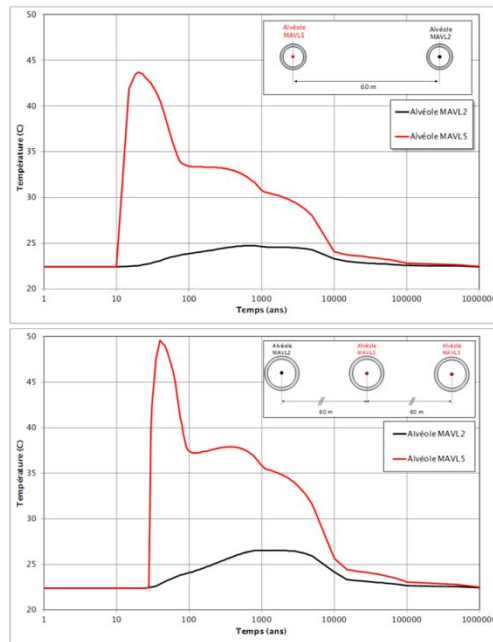
- pour préserver les caractéristiques des bétons : l'Andra retient un critère de 65 °C au contact des composants cimentaires ;
- pour maîtriser le comportement des radionucléides dissous, celui-ci étant sensible à la température : l'Andra considère dans cette optique un critère de 70 °C.

Dans le cas particulier des enrobés bitumineux, on vise à limiter autant que possible leur température de stockage, en tenant compte des facteurs techniques, afin de limiter une possible sédimentation des sels qui se traduirait par une diminution de la capacité de confinement de l'enrobé (Tableau 3.3-1). Cela passe par un stockage dans des alvéoles dédiés et par la distance horizontale séparant les alvéoles contenant des déchets MA-VL faiblement exothermiques tels que les déchets de structure (Figure 3.3-4).

⁵⁹ Dans le cas où des bétons de type CEM V sont utilisés, on ne peut exclure la possibilité d'un transitoire de pH élevé ($> 12,5$) au contact de l'enrobé bitumineux. Néanmoins après ce transitoire, les conditions de pH au contact des enrobés diminuent du fait (i) de la dégradation des matériaux cimentaires et (ii) de la dégradation du bitume qui conduit au relâchement d'espèces acides.

⁶⁰ Deux états du ciment sont considérés : état sain, c'est-à-dire matériau cimentaire en équilibre avec la portlandite après lixiviation des alcalins et état altéré, c'est-à-dire matériau cimentaire en équilibre avec les phases CSH après dissolution de la portlandite.

⁶¹ Cette exigence impacte l'exploitation du stockage notamment l'organisation dans l'alvéole MA-VL des colis de stockage et l'organisation dans le quartier MA-VL (cf section 1.6 relative aux caractéristiques dimensionnantes du DOS-EXpl).



CG.IM.AEAP.15.0061.A

Figure 3.3-4 : Evolution de la température dans un alvéole de déchets non exothermiques (noir) en fonction de la localisation ou du regroupement d'alvéoles de déchets MA-VL faiblement exothermiques à son voisinage

3.3.2.3 Contributions à la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides »

Comme les autres quartiers de stockage, le quartier MA-VL adopte une géométrie planaire.

Il est positionné dans la partie médiane du Callovo-Oxfordien pour préserver des gardes d'argilites « saines⁶² » aussi épaisses que possible au-dessus et au-dessous du quartier.

Cela impose d'adapter la longueur et la pente des alvéoles au pendage du Callovo-Oxfordien ; pour le dimensionnement du quartier, l'Andra a retenu un critère d'épaisseur minimale de 50 mètres.

La figure ci-dessous montre que les épaisseurs d'argilites situées au-dessus et en-dessous du quartier MA-VL sont de l'ordre de 70 m pour un positionnement du stockage en milieu du Callovo-Oxfordien.

⁶² L'épaisseur de garde verticale d'argilites saines est déterminée pour chaque ouvrage en soustrayant à la garde verticale au toit et au mur de l'ouvrage l'extension verticale maximale de la zone d'argilites endommagées respectivement en voûte et en radier.

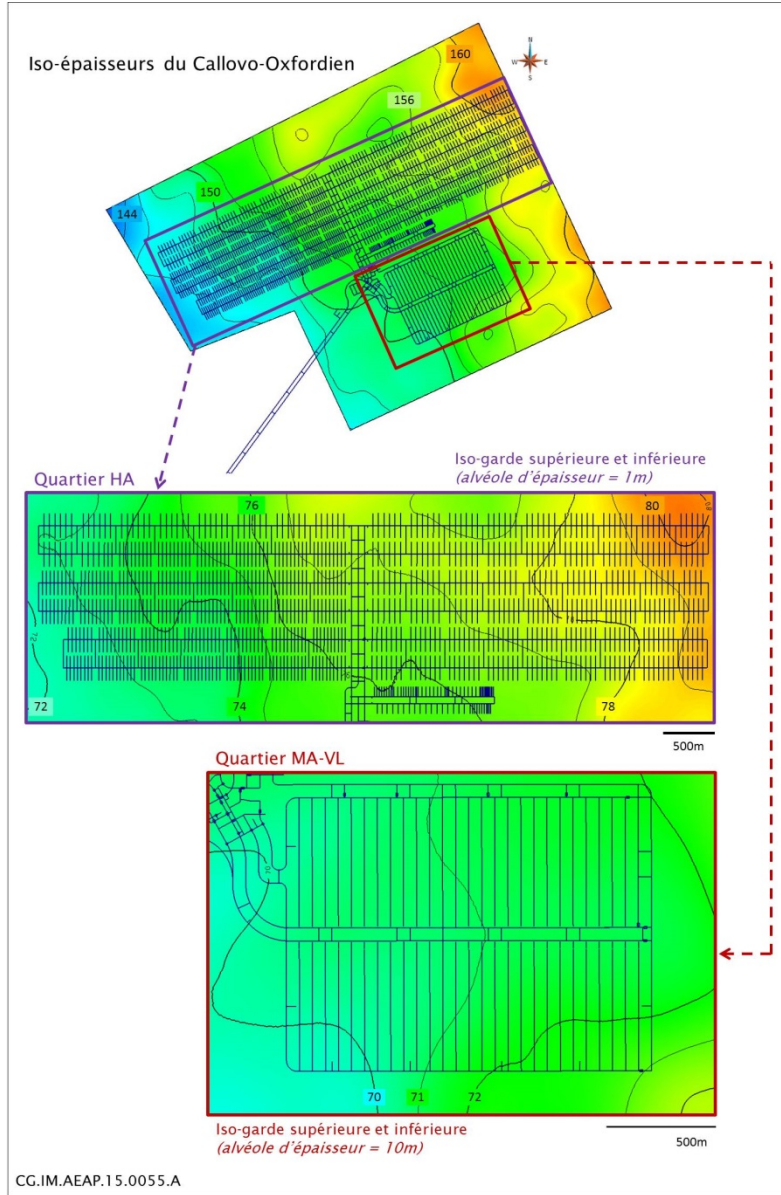


Figure 3.3-5 : Epaisseurs d'argilites pour un stockage dont le plan médian serait positionné sur la surface du milieu géométrique du Callovo-Oxfordien

L'orientation des alvéoles de stockage MA-VL dans la direction de la contrainte principale majeure limite l'extension de la zone endommagée, comme l'ont montré les observations au Laboratoire souterrain.

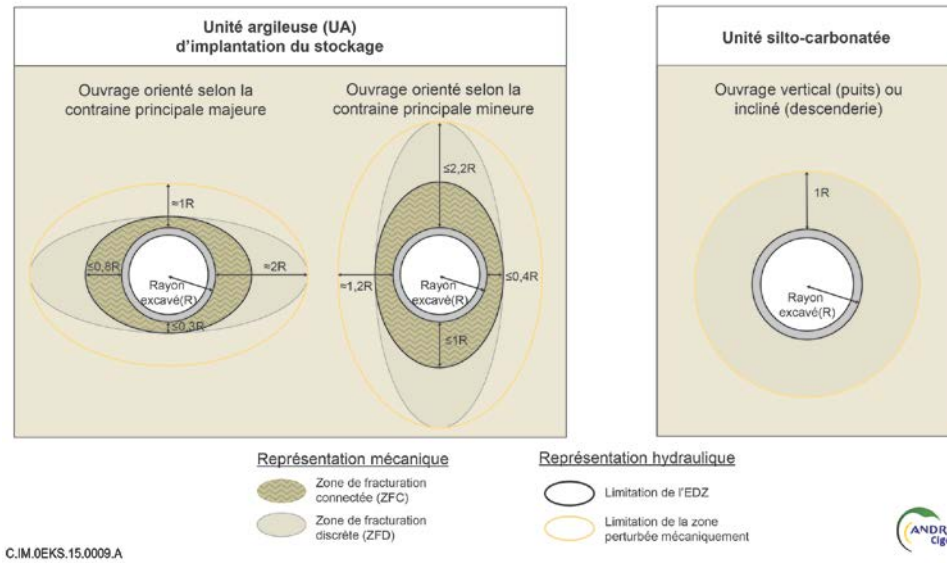


Figure 3.3-6 : Effet de l'orientation des ouvrages souterrains sur l'EDZ dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien

De plus, l'Andra limite les volumes vides résiduels et les volumes compressibles dans les alvéoles MA-VL afin de réduire autant que possible les déformations différées des argilites après rupture des revêtements et la création d'une ZFC (zone fracturée connectée) de sur-endommagement. L'extension de cette ZFC de sur-endommagement dépend en effet directement du taux de vide de l'alvéole MA-VL (Figure 3.3-7). Par exemple, un taux de vide de 10 % conduit à une extension de l'endommagement en voûte de l'ordre d'un diamètre et à une extension latérale légèrement supérieure à un diamètre. Les limites retenues par l'Andra en termes de volumes de vides sont définies en fonction de la hauteur excavée (29).

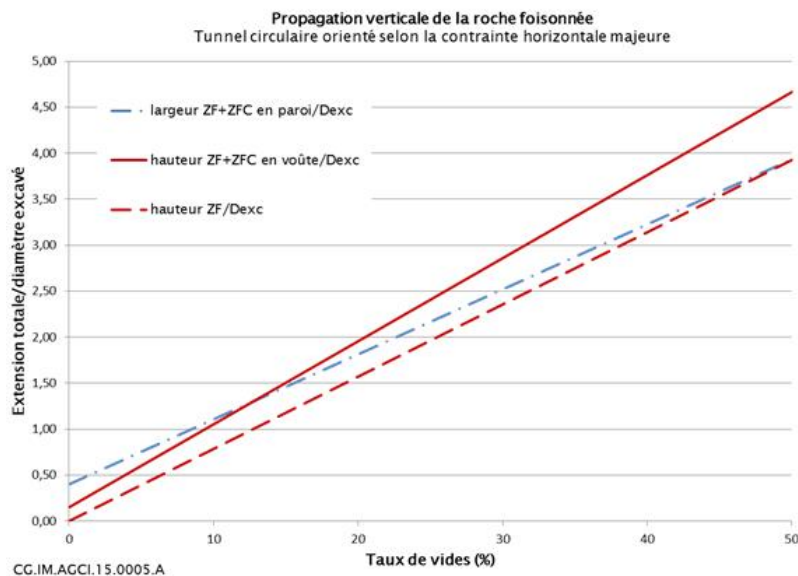


Figure 3.3-7 : Estimation des extensions horizontale et verticale de la zone de roche foisonnée (ZF) et de la zone de roche fracturée connectée (ZFC) à partir de la paroi excavée, en fonction du taux de vide

Cela repose sur :

- le béton de remplissage qui permet d'adapter la chambre de stockage au gabarit des colis stockés ;
- la géométrie des colis ;
- la minimisation des jeux nécessaires à la manutention des colis dans l'alvéole, en tenant compte des autres contraintes techniques.

Par ailleurs une longueur des alvéoles MA-VL (partie utile et extrémités) aussi grande que possible et raisonnable tend à minimiser la part de radionucléides et toxiques chimiques susceptibles de migrer longitudinalement vers les galeries de liaison. Le choix de la longueur de 500 mètres pour la partie utile s'inscrit dans une optique d'optimisation en tenant compte également des autres facteurs, en particulier :

- la nécessité mentionnée *supra* de limiter la longueur vis-à-vis de la préservation des gardes d'argilites au-dessus et au-dessous du quartier de stockage ;
- les contraintes techniques de construction et d'exploitation ;
- les contraintes retenues en matière de séparation des colis de déchets en fonction de leurs interactions physico-chimiques.

Tableau 3.3-1 : Exigences et options de conception associées

Exigences / performance	Dispositions de conception	Composant
La préservation des performances de confinement des déchets bituminés suppose le maintien d'une géométrie proche de la géométrie initiale. En effet les modèles de relâchement ne sont valables que dans un domaine de géométrie connu.	Les colis primaires de déchets bituminés sont maintenus en position verticale.	Colis de stockage MA-VL (§ 2.5)
Les déchets bituminés sont stockés à une température modérée (30° C, sachant que des écarts restent possibles par rapport à cette valeur de référence ⁶³) pour limiter l'occurrence d'un phénomène de sédimentation susceptible de modifier leur comportement sous irradiation et leur altération sous eau.	Les colis de déchets bituminés sont stockés dans des alvéoles dédiés.	Quartier et alvéole de stockage MA-VL
Le respect d'une gamme de pH basique permet de rester dans le domaine où le comportement de l'enrobé est connu. Plus particulièrement, on vise à maintenir un pH compris entre 7 et 12,5.	Utilisation de béton dans l'alvéole MA-VL	Conteneur de stockage MA-VL
Pour les déchets métalliques, il est imposé un environnement cimentaire (pH > 11) associé à des conditions redox anoxiques. En effet ces conditions sont favorables à de faibles cinétiques de corrosion par effet de passivation (pour les aciers), et donc à un lent relâchement des produits d'activation contenus dans les pièces métalliques.		Alvéole de stockage MA-VL
Pour les déchets contenant en quantité significative des radionucléides tels que le nickel, le cobalt, l'américium, le curium, le neptunium, le plutonium, des conditions cimentaires seront recherchées.		

⁶³ Pendant l'exploitation, la température dans l'alvéole de stockage est gérée de manière passive (cf. Volume III du DOS-Expl). Une flexibilité jusqu'à 40°C est associée à des situations exceptionnelles par exemple en situation incidentelle afin de se prémunir des effets cumulatifs vis-à-vis de la sédimentation associés à des cycles d'échauffement.

Exigences / performance	Dispositions de conception	Composant
La température dans les déchets MA-VL et leur environnement est inférieure à 70 °C.	Les alvéoles de stockage de déchets non ou peu exothermiques sont dimensionnés et placés à une distance suffisante des autres alvéoles pour que la température y reste en permanence inférieure à 70 °C.	Quartier et alvéole de stockage MA-VL
Les déformations différées des argilites après rupture du revêtement doivent être limitées.	Le volume des vides résiduels dans les alvéoles après obturation devra être le plus faible possible et régulièrement distribué le long et dans la section de l'alvéole, en tenant compte des contraintes techniques, afin d'éviter la propagation de désordres mécaniques dans les argilites à long terme, après perte d'intégrité des revêtements	Conteneur de stockage MA-VL Alvéole de stockage MA-VL
Hormis pour les alvéoles de stockage de déchets susceptibles de générer des espèces complexantes, l'utilisation de matières organiques ou de substances complexantes sera réduite autant que possible dans la constitution des conteneurs de stockage et des alvéoles. En particulier, pour le renforcement par fibres et l'adjuvantation des bétons, le choix des matériaux et leurs quantités devront être justifiés au regard de cette exigence.	Choix des matériaux constitutifs des conteneurs de stockage et du revêtement.	Conteneur de stockage MA-VL Alvéole de stockage MA-VL

3.3.3 Retour d'expérience

Les enjeux scientifiques et techniques prioritaires de l'alvéole de stockage MA-VL concernent :

- les techniques de creusement ;
- le dimensionnement du revêtement/soutènement au regard de la section de l'alvéole et du mode de creusement considérés ;
- les performances de l'alvéole en matière de durabilité mécanique et de limitation de l'EDZ au regard des conditions d'environnement (*i.e.* sollicitations internes et externes).

En ce qui concerne les techniques de creusement, des ouvrages du Laboratoire souterrain ont été construits avec des méthodes représentatives de celles des alvéoles MA-VL (MAP) dans la direction de la contrainte principale majeure. Cette technique a été testée jusqu'à un diamètre de près de 8 mètres (tronçon de galerie GRD3), représentatif d'alvéoles de stockage de 65-70 m². Le soutènement par béton projeté et boulonnage a été également testé (complété selon les cas par des cintres métalliques). La réalisation d'un béton de revêtement coffré a été testée sur un diamètre plus petit.

En matière de revêtement/soutènement, la stratégie expérimentale mise en œuvre au niveau principal du Laboratoire souterrain a été de réaliser des galeries orientées dans la direction de la contrainte principale majeure avec des soutènements/revêtements de plus en plus rigides afin de pouvoir comparer leur comportement à court et moyen terme. Les premiers soutènements en béton mis en œuvre étaient des soutènements dits « souples », c'est-à-dire accompagnant les convergences du terrain (béton projeté avec ou sans cales compressibles). Puis, des soutènements plus rigides (épaisseur accrue et revêtements coulés en place quelques mois après le creusement) ont aussi été réalisés afin de limiter les déformations du terrain et enfin, des revêtements posés rapidement après le creusement de la galerie (béton projeté épais lors en 2012, voussoirs en béton en 2013). Tous ces ouvrages sont ou vont être instrumentés. Les comparaisons des mesures de contraintes et de déformation dans et autour de ces différents soutènements/revêtements constituent un apport important pour le dimensionnement⁶⁴ des alvéoles MA-VL dans le cadre des études d'APS puis d'APD⁶⁵.

⁶⁴ Au-delà des données de calage des modèles de comportement mécanique de l'argilite et du béton, elles donnent accès aux mécanismes d'interactions entre le terrain et les structures, qui peuvent avoir un impact fort sur le dimensionnement.

⁶⁵ La zone fracturée connectée induite par le creusement présente des caractéristiques de plasticité et de déformations différées spécifiques. Cela induit un chargement « à court terme » anisotrope des revêtements .../...



Figure 3.3-8 : Creusement de la chambre de montage du tunnelier pour l'essai GVA2 au Laboratoire souterrain (diamètre excavé de 9,1 m)

Afin de conforter la possibilité d'augmenter la section des alvéoles de stockage, des essais in situ sont envisagés dans le cadre de la phase industrielle pilote. Cela comprend la construction d'un alvéole d'essai intégrant tous les éléments de sa conception. L'endommagement sera caractérisé et les contraintes et déformations dans le revêtement feront l'objet d'un suivi. Des essais inactifs d'exploitation y seront aussi réalisés.

Selon les résultats obtenus en phase industrielle pilote, la construction d'alvéoles de stockage MA-VL de diamètre supérieur à l'option actuellement retenue pourra être envisagée ultérieurement selon le processus de développement incrémental et déploiement progressif présenté dans le PDE (8).

3.3.4 Maîtrise des interactions physico-chimiques

3.3.4.1 Exigences de séparation des colis de déchets MA-VL

L'Andra a identifié trois catégories de colis de déchets MA-VL susceptibles de générer des perturbations physico-chimiques (cf annexe 9) :

- MA-VL1 : colis de déchets non bitumés contenant une quantité significative de sels, générateurs d'une perturbation « saline » ;
- MA-VL2 : colis de déchets bitumés, également générateurs d'une perturbation saline ;
- MA-VL3 : colis contenant des matières organiques (polymères, cellulose), dont les produits de dégradation peuvent être complexants et affecter le comportement des radionucléides.

L'Andra retient de stocker les colis de ces trois catégories dans des alvéoles dédiés à chacune d'elles et suffisamment éloignés pour éviter que les perturbations engendrées n'affectent les autres catégories de colis de déchets.

Quatre autres catégories de familles sont identifiées :

même pour des ouvrages orientés parallèlement à la contrainte principale majeure comme les alvéoles MA-VL de stockage, soumis à un champ de contraintes isotropes.

- MA-VL4 : colis de déchets non ou faiblement exothermiques cimentés ne contenant ni matière organique⁶⁶ ni sels ;
- MA-VL5⁶⁷ : colis de déchets non ou faiblement exothermiques non cimentés⁶⁸ ne contenant ni matière organique⁶⁹ ni sels, notamment les déchets de structure issus du traitement des combustibles ;
- MA-VL6 : colis de déchets vitrifiés, non ou faiblement exothermiques, éventuellement après une phase préalable d'entreposage de décroissance qui permet de les déclasser de la catégorie HA0 ;
- MA-VL7 : colis de déchets sodés⁷⁰

3.3.4.2 La perturbation saline

La dégradation des déchets MA-VL riches en sels conduit au relâchement de composés nitrates et sulfates susceptibles d'accroître la force ionique, en conséquences (i) de modifier la réactivité et la migration des radionucléides dans les argilites⁷¹, (ii) d'imposer des effets hygroscopiques et osmotiques dans les ouvrages.

Modification de la réactivité et de la migration des radionucléides

Des travaux sur les argilites ou sur des phases argileuses pures ont été menés pour évaluer les effets de la perturbation saline sur les propriétés de transfert des radionucléides. En champ proche, les effets attendus sont essentiellement :

- une légère augmentation des propriétés de diffusion pour les espèces anioniques (diminution de l'exclusion anionique, co-diffusion). Des facteurs correctifs sur le transport permettent de prendre en compte ces effets en fonction de la force ionique ;
- une légère diminution de la sorption des ions alcalins et alcalino-terreux. Les effets de la force ionique et des cations compétiteurs sont pris en compte dans les valeurs de Kd.

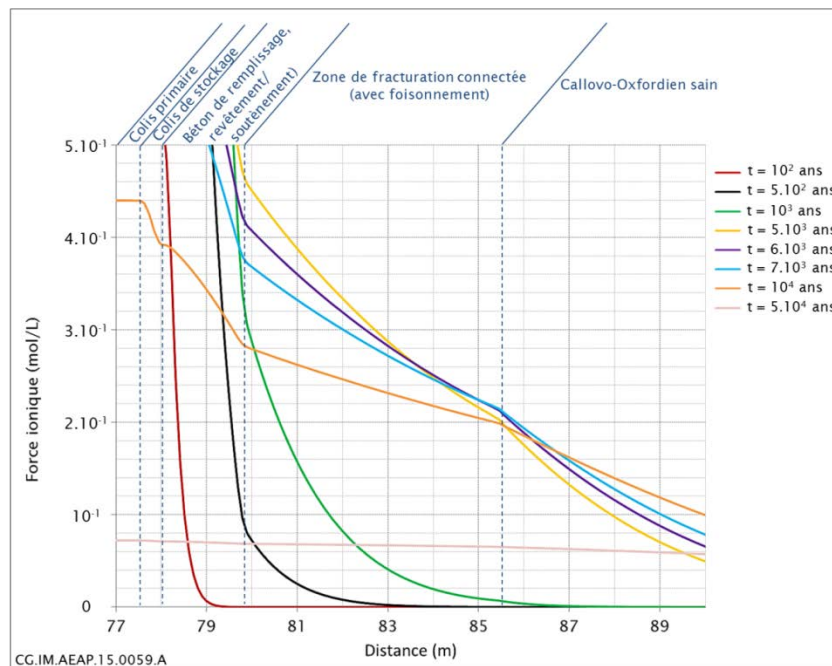


Figure 3.3-9 : Profils temporels de la force ionique au droit d'un alvéole de stockage MA-VL de colis de déchets salins

⁶⁶ A l'exception des étiquettes sur étuis intermédiaires, colle ou peinture.

⁶⁷ La possibilité de co-stocker les MA-VL4 et MA-VL5 est en cours d'étude et sera confirmée dans le cadre de la DAC.

⁶⁸ Les matrices à base de géopolymères entrent dans cette catégorie.

⁶⁹ A l'exception des étiquettes sur étuis intermédiaires, colle ou peinture.

⁷⁰ Sodium métallique interdit au stade actuel des spécifications préliminaires.

⁷¹ Ces effets sont d'autant plus importants que la force ionique est élevée.

Effets hygroscopiques et osmotiques

Les principaux effets liés à la modification de l'activité de l'eau se traduisent par :

- en milieu non saturé en eau, des effets hygroscopiques pour les alvéoles de stockage de colis de déchets salins qui peuvent perdurer quelques centaines d'années après fermeture ;
- après fermeture, les effets osmotiques (génération de flux d'eau des zones à faibles concentrations salines vers les zones à fortes concentrations salines) conduisent principalement à une modification de l'organisation de la resaturation de l'alvéole se traduisant par une resaturation plus rapide des colis de déchets ; la durée globale de resaturation de l'ouvrage n'est pas modifiée.

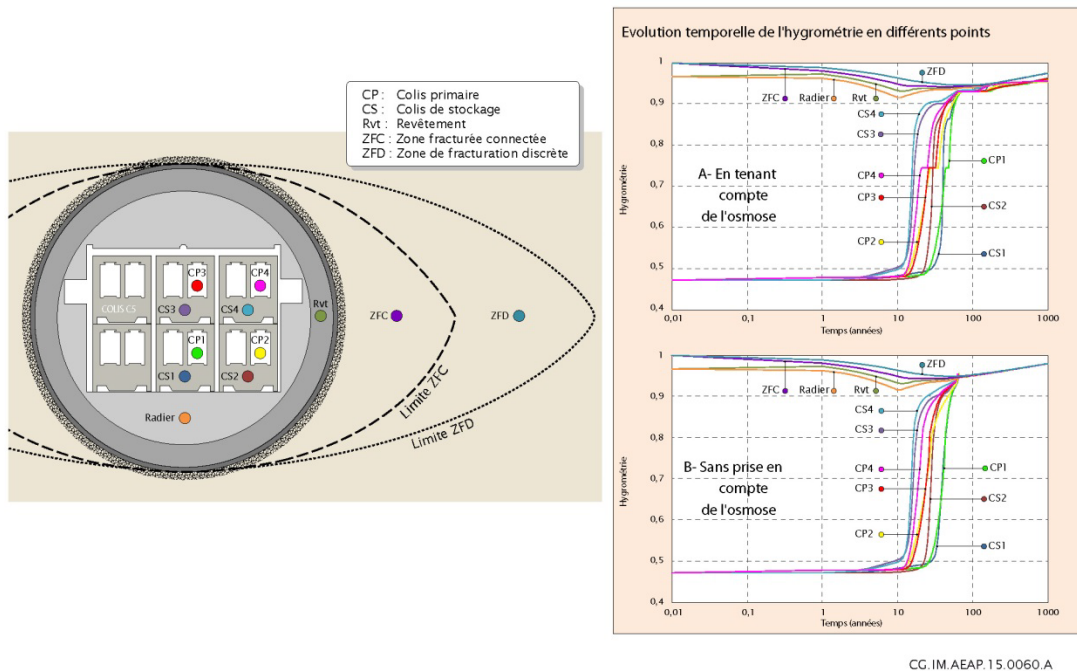


Figure 3.3-10 : Effet osmotique lié à la présence des sels issus des déchets de catégorie MA-VL1 sur l'hygrométrie d'un alvéole au cours du premier millénaire après mise en place

Estimation du volume perturbé autour des déchets de catégories MA-VL1 et MA-VL2

Les estimations actuelles montrent que le panache de nitrate s'étend dans les argilites :

- uniquement au sein de la ZFC (en tenant compte de l'évolution mécanique à long terme après perte d'intégrité du revêtement, voir *supra*) avec une concentration excédant transitoirement $0,2 \text{ mol.l}^{-1}$;
- au maximum jusqu'à 10 mètres de la paroi des alvéoles avec une concentration de plus de $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$, pendant environ 10 000 ans (à saturation en eau).

Ce panache salin pourrait être atténué par l'activité bactérienne dans l'alvéole (non prise en compte dans les évaluations ci-dessus).

Les effets hygroscopiques et osmotiques sont tous deux d'extension limitée au voisinage immédiat des colis et n'ont aucune influence significative au-delà du béton de revêtement des alvéoles.

Ainsi les effets de la perturbation saline sur le retard et l'atténuation de la migration des radionucléides contenus dans les déchets de catégories MA-VL1 et MA-VL2 restent limités, compte tenu de l'épaisseur des gardes d'argilites non ou peu perturbées autour des alvéoles MA-VL.

3.3.4.3 La perturbation organique

La dégradation des colis de déchets organiques MA-VL se traduit par le relâchement d'espèces organiques en solution dont certaines peuvent complexer les radionucléides et diminuer leur rétention. Ces effets ne sont observables qu'au-delà d'un seuil de concentration aqueuse en organiques.

Seules quelques molécules organiques sont identifiées comme ayant un effet significatif sur le comportement des radionucléides dans les argilites notamment l'acide iso-saccharinique (ISA) produit par la dégradation de la cellulose et les phtalates relâchés lors de la dégradation du PVC.

Le pouvoir de complexation de ces molécules dépend également de la nature des radionucléides. Des seuils de sensibilité pour une concentration en ISA supérieure à 10^{-4} mol.l⁻¹ et une concentration en phtalates supérieure à 10^{-3} mol.l⁻¹ ont été identifiés pour les argilites.

L'évaluation de l'extension de la perturbation organique autour de chaque alvéole MA-VL par des modélisations en transfert réactif indique des concentrations aux seuils indiqués ci-dessus d'au maximum un mètre pour l'ISA et environ 15 m pour les phtalates⁷².

Les effets de la perturbation organique vis-à-vis des radionucléides autour des alvéoles de déchets de catégorie MA-VL3 restent limités en distance, préservant des performances de retard et d'atténuation de la migration des radionucléides contenus dans ces déchets. Néanmoins, à ce stade, en termes de robustesse, on retient des dispositions en matière de séparation physico-chimique des déchets de la catégorie MA-VL3 vis-à-vis des autres déchets.

3.4 Les ouvrages de fermeture

Les ouvrages de fermeture comprennent les scellements, les bouchons des alvéoles HA et les remblais.

3.4.1 Fonctions de sûreté et options de conception des scellements

3.4.1.1 Les différents types de scellements et leurs contributions aux fonctions de sûreté

D'une manière générale les scellements contribuent à s'opposer à la circulation de l'eau dans le système de stockage. Ils sont classés en trois catégories :

- scellements verticaux ;
- scellements inclinés ;
- scellements horizontaux (ou scellements de fond).

Les scellements verticaux et inclinés sont implantés dans les liaisons surface-fond qui traversent les formations sus-jacentes, dont certaines (les calcaires du Barrois et les horizons poreux de l'Oxfordien calcaire) sont significativement plus transmissives que le Callovo-Oxfordien. Des scellements situés au droit de l'unité Silto-Carbonatée (USC) et de l'unité de transition (UT) du Callovo-Oxfordien pour les puits, et au droit de l'USC pour les descenderies, contribuent à limiter les flux d'eau entre le système de stockage et les formations sus-jacentes. De plus des scellements de séparation des formations aquifères sont prévus au droit du Kimméridgien. Ceux-ci participent à mobiliser la capacité naturelle de dispersion et de dilution des formations encaissantes. Il est à noter que l'Andra n'attribue pas de fonction de sûreté après fermeture aux ouvrages d'étanchéité réalisés au droit du Barrois et au toit du Callovo-Oxfordien pour l'exploitation des liaisons surface-fond.

Les scellements horizontaux sont implantés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien, dans les galeries de liaison reliant les quartiers de stockage et les liaisons surface-fond. Ces scellements augmentent la « résistance hydraulique » des galeries. Au moins deux scellements sont placés sur chaque trajet entre un quartier et les liaisons surface-fond : cette disposition permet de répartir les pertes de charge hydraulique au sein des galeries. L'Andra retient de positionner l'un de ces scellements au plus près des quartiers de stockage⁷³. En cas de perte de la fonction hydraulique des

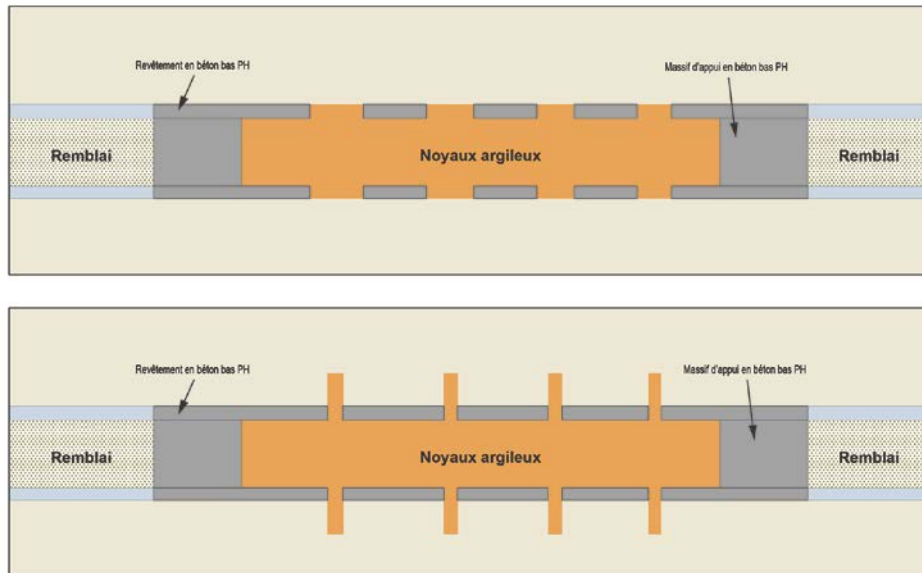
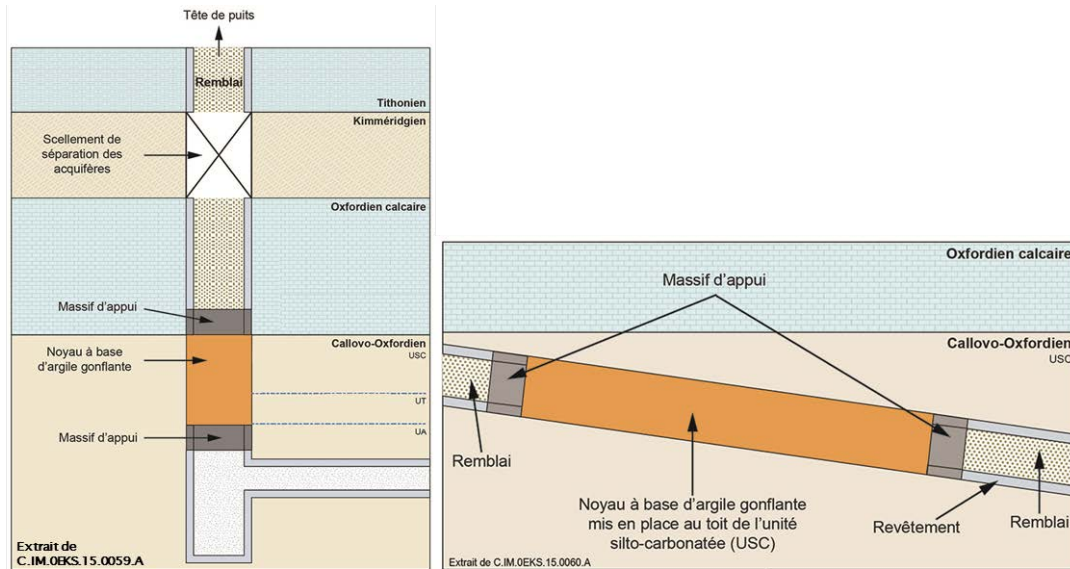
⁷² Les incertitudes sur ces évaluations sont en partie liées à celles sur les inventaires en organiques et leurs variabilités dans les différentes familles.

⁷³ Au stade actuel, une distance maximale de 400 mètres est considérée entre ce scellement et l'alvéole le plus proche.

scellemets verticaux ou inclinés, les scellemets horizontaux limitent ainsi les flux d'eau et les flux de radionucléides en solution transportés le long des galeries jusqu'à la base des liaisons surface-fond.

Le besoin et le mode de scellement de l'entrée des alvéoles MA-VL ainsi que leur retour d'air sont également étudiés. A ce stade, le principe des scellemets horizontaux peut être utilisé, et l'Andra examine aussi la possibilité d'un remblai de forte densité et de perméabilité spécifiée, éventuellement constitué d'un mélange d'argilite et d'argile gonflante.

La figure ci-après illustre les schémas de principes des trois typologies de scellemets précités.



C.IM.AMSI.16.0026.A



Figure 3.4-1 : Schémas de principe des scellemets inclinés, verticaux, horizontaux

Le tableau ci-après précise la contribution des principaux types de scellement aux fonctions de sûreté après fermeture de Cigéo.

Tableau 3.4-1 : Contribution des différents types de scellements dans le Callovo-Oxfordien à la fonction « S'opposer aux circulations d'eau »

Sous-fonction de sûreté	Objectif	Type de scellements	
Limiter les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes via les liaisons surface-fond	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant le transitoire de saturation du stockage : <ul style="list-style-type: none"> ✓ limiter les flux d'eau provenant des formations sus-jacentes • Après saturation totale du stockage (régime permanent) : <ul style="list-style-type: none"> ✓ limiter les flux d'eau provenant du Callovo-Oxfordien drainés par le stockage 	Scellements verticaux et inclinés des liaisons surface-fond (au droit de l'USC et de l'UT)	
			Scellements horizontaux (scellements de galeries de liaison et éventuels scellements d'alvéoles de déchets MA-VL)
Limiter les vitesses de circulation d'eau dans les galeries	Organiser la distribution des gradients dans le stockage		

3.4.1.2 Options de conception des scellements verticaux et inclinés dans le Callovo-Oxfordien

Parmi l'ensemble des scellements, en regard de leur position en sortie du stockage, les scellements des ouvrages de liaison surface-fond jouent le rôle le plus important dans la sûreté passive après fermeture.

Cette option de sûreté suit les recommandations du guide de sûreté de l'ASN de 2008 (1) qui indique que « Les liaisons jour-fond et éventuellement certaines galeries et certains ouvrages de l'installation de stockage devront faire l'objet de scellements assurant une étanchéité de qualité spécifiée. Cette préoccupation doit être intégrée dès leur conception ».

L'Andra retient une conception des scellements verticaux et inclinés sur la base des meilleures techniques disponibles : à ce stade, leur composant principal est un noyau à base d'argile gonflante, occupant toute la section de la descendrière et du puits et placé en contact direct avec les argilites.

Cette conception s'appuie sur les caractéristiques mécaniques intrinsèques des argilites au droit de l'USC favorables (comme observé au Laboratoire souterrain, au niveau -445 m), à l'absence de zone fracturée connectée, donc *in fine* à l'absence d'EDZ, et à la bonne tenue du terrain qui nécessite peu de soutènement lors de l'excavation, ce qui devrait faciliter la dépose du revêtement avant la construction du noyau.

La formulation de l'argile constitutive du noyau (argile gonflante pure ou mélangée à des additifs comme du sable siliceux ou calcaire) vise à obtenir une perméabilité aussi petite que possible et raisonnable. A ce stade, le matériau et sa densité sèche de mise en place seront choisis de façon à

obtenir une pression de gonflement (pression effective) restant, au cours de son évolution, dans un domaine jusqu'à 4 MPa maximum⁷⁴.

De même, l'Andra retient un objectif de perméabilité à saturation en grand du noyau de l'ordre de 10^{-11} m/s, sur la base des résultats des évaluations, études, recherches et essais réalisés notamment au Laboratoire souterrain.

Le noyau argileux doit être confiné mécaniquement afin de permettre sa mise en charge hydromécanique à volume constant et ainsi favoriser la reprise éventuelle des jeux de mise en place et une bonne interface hydraulique avec les argilites. A ce stade, le confinement est assuré par des massifs de béton, qui doivent résister mécaniquement aux sollicitations hydrauliques et gaz de part et d'autre du noyau qui pourraient survenir dans le temps, notamment lors du transitoire hydraulique-gaz du stockage. Leur longueur, que l'on considère à ce stade de l'ordre d'un diamètre de l'ouvrage à sceller, et leurs modalités d'ancrage éventuel dans la roche (USC pour les scellements de descenderies, USC et Oxfordien carbonaté pour les scellements de puits) seront dimensionnés à cette fin. L'emploi de formulations de béton de type « bas pH » (pH du béton sain [après prise] ≤ 11) est spécifié à la fois pour les massifs et pour les tronçons de revêtements qui pourraient rester en place (en particulier au droit des massifs). Ce type de formulation contribue à (i) une bonne mise en place garante de leur fonction mécanique (limitation du retrait par limitation de l'échauffement lié à la prise du béton,) (ii) une très lente évolution chimique et physique du béton sur le long terme et (iii) une limitation de l'effet chimique du béton sur le noyau argileux, favorable aux propriétés hydrauliques et hydromécaniques du noyau.

La longueur du noyau lui confère une marge de robustesse vis-à-vis notamment (i) d'une réduction des propriétés de perméabilité et de gonflement du noyau à l'interface avec les massifs d'appui en béton, qui pourrait être liée à une perturbation alcaline ou (ii) d'une diminution à long terme des propriétés mécaniques des massifs d'appui avec pour conséquence un léger déconfinement du noyau dans la zone proche de ces massifs. Dans les puits, on retient la plus grande longueur possible compte tenu de l'épaisseur de l'USC, permettant de tirer parti des propriétés mécaniques favorables des argilites de cette unité. Pour les descenderies, une longueur du noyau minimale de 100 mètres est considérée.

Les exigences et les performances retenues pour les scellements verticaux et inclinés de même que les options de conception associées sont retranscrites dans le tableau ci-dessous.

⁷⁴ Plusieurs techniques sont envisageables pour mettre en place le matériau à base d'argile gonflante : blocs préfabriqués, damage d'argile en pellets (ou en mélange pellets et poudre), projection. La méthode de mise en place (qui peut coupler plusieurs des techniques de mise en forme de l'argile gonflante précitées) doit permettre de limiter les vides résiduels au niveau le plus faible possible, en particulier en clé de voûte pour les descenderies.

Tableau 3.4-2 : Exigences et performances attendues et options de conception pour les scellements verticaux et inclinés

Exigences / performances	Dispositions de conception	Sous-composant concerné
<p>Pour garantir un gonflement et des propriétés du noyau les plus homogènes possibles, les vides résiduels sont limités au niveau le plus faible possible.</p>	<p>Mise en place du noyau argileux sous forme de pellets et de poudre d'argile gonflante pure ou mélangée. Une mise en place du noyau en argile gonflante avec des briques d'argile gonflante compactée constitue une alternative.</p>	<p>Noyau argileux</p>
<p>De manière à limiter les déformations des argilites à son contact et à favoriser la fermeture mécanique des fractures des argilites endommagées, on vise à obtenir une pression de gonflement du noyau d'au moins quelques méga-pascals.</p>	<p>Choix d'une densité de mise en place adaptée à la nature minéralogique de l'argile gonflante.</p> <p>Longueur minimale du noyau égale à :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Scellements inclinés : 100 m ▪ Scellements verticaux : 40 m 	
<p>Compte tenu du rôle de frein hydraulique des scellements, on vise à atteindre une perméabilité à saturation du noyau et de son interface avec les autres matériaux de l'ordre de 10^{-11} m/s.</p>		
<p>Pour éviter que le revêtement ne constitue une voie de circulation préférentielle d'eau venant court-circuiter le noyau argileux, sa continuité doit être interrompue.</p>	<p>Dépose du revêtement sur le linéaire devant accueillir le noyau argileux.</p> <p>.</p>	<p>Interface noyau / argilites en paroi; revêtements</p>
<p>La perturbation chimique issue des portions de revêtement à proximité du noyau argileux doit être limitée au maximum.</p>	<p>Les portions de revêtement laissées en place seront de type béton « bas pH » (jusqu'à une distance au moins égale à un diamètre de l'ouvrage de part et d'autre du noyau).</p>	
<p>Dans l'USC, l'augmentation de perméabilité à l'eau de la zone d'argilites autour de l'ouvrage devra être inférieure ou égale à deux ordres de grandeur par rapport à celle des argilites saines.</p>	<p>Autant que possible, méthode de creusement des liaisons surface-fond ne créant pas de zone d'argilites fracturées connectées 3D (ZFC) en paroi, comme dans l'UA.</p>	<p>Argilites en paroi</p>

Exigences / performances	Dispositions de conception	Sous-composant concerné
Le noyau en argile gonflante doit être confiné mécaniquement, afin de favoriser l'atteinte d'une perméabilité en grand petite, et une bonne interface hydraulique avec les argilites.	Mise en place de massifs d'appui en béton de part et d'autre du noyau argileux et dont le dimensionnement (longueur, géométrie, ancrage éventuel) : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Prend en compte la dégradation chimique du béton. ▪ Permet une stabilité et une durabilité aussi grandes que possible. 	Massifs d'appui
La perturbation chimique issue du dispositif de confinement mécanique du noyau argileux doit être limitée au maximum.	Utilisation de formulation de béton de type bas pH.	

3.4.1.3 Options de conception des scellements au droit du Kimméridgien

Des scellements au droit du Kimméridgien sont prévus sur le même principe que les scellements au niveau du Callovo-Oxfordien (voir *supra*).

Les scellements sont positionnés dans la partie supérieure du Kimméridgien.

En matière de fonctionnement à long terme, aucune spécificité de nature à rendre ce fonctionnement significativement différent de celui des scellements dans le Callovo-Oxfordien, n'est identifiée.

3.4.1.4 Options de conception des scellements horizontaux

Pour les scellements horizontaux, l'Andra étudie une conception avec pour composant principal un noyau à base d'argile. En comparaison du scellement incliné présenté ci-dessus, la présence d'une ZFC autour des galeries et les caractéristiques hydromécaniques des argilites de l'UA impliquent une approche particulière des scellements horizontaux à la fois en termes de performances et de conception.

Les données acquises sur le comportement hydraulique de la zone endommagée montrent l'existence d'un auto-colmatage lié au gonflement des minéraux inter-stratifiés illite/smectite des argilites, ce qui se traduit par la récupération progressive d'une faible perméabilité, d'au moins deux ordres de grandeur inférieure à celle initiale après excavation dans la ZFC et proche de celle des argilites saines dans la ZFD. L'Andra maintient néanmoins ouverte à ce stade la possibilité de prendre en compte ou non le phénomène d'auto-colmatage en étudiant deux options en parallèle :

- en référence, le revêtement de la galerie est retiré totalement ou par portions au droit du noyau de manière à ce que celui-ci soit en contact direct avec les argilites sur une longueur cumulée d'au moins quelques mètres au moment de la mise en place (soit typiquement 4 zones de dépose de longueur métrique) ; les performances du scellement mobilisent ici la fermeture mécanique des fissures (favorisée le cas échéant par le développement d'une pression de gonflement du noyau, jusqu'à 4 mégapascals - voir *infra*) et l'auto-colmatage ;
- en variante, des coupures hydrauliques radiales de l'EDZ sont réalisées en complément du noyau en argile : 3 à 5 coupures seraient ainsi placées à intervalles réguliers, consistant en des saignées d'épaisseur 30 cm réalisées à la scie⁷⁵, remplies par un matériau à base d'argile gonflante (mis en place sous forme de pièces compactées ou de pellets, à ce stade). Le revêtement n'est déposé qu'au droit des coupures hydrauliques.

La mise en place des scellements horizontaux dans les tronçons de galerie orientés parallèlement à la contrainte principale majeure est retenue, pour tenir compte d'un développement de la zone fracturée

⁷⁵ La profondeur visée pour les saignées est de l'ordre de 0,8 fois le rayon excavé.

connectée sur les parements et de façon moindre en voûte favorisant notamment (i) la dépose du revêtement et (ii) la réalisation des coupures hydrauliques.

L'Andra a défini un objectif de performance pour les scellements horizontaux, exprimé en termes de perméabilité en grand inférieure à 10^{-9} m/s. Cette perméabilité en grand intègre tous les composants, notamment l'interface noyau-argilites particulièrement dimensionnant (voir *infra*).

A l'image des scellements inclinés et verticaux, des massifs de béton de type « bas pH » peuvent être construits de part et d'autre pour confiner mécaniquement le noyau, en fonction de la pression de gonflement qui lui sera conférée. Plusieurs conceptions des massifs d'appui sont étudiées par l'Andra et leurs performances mécaniques évaluées, prenant en compte notamment le frottement du massif sur la paroi et/ou la réalisation de redan(s) s'ancrant dans les argilites de l'UA.

Les options de conception des scellements horizontaux pourront évoluer pour répondre au mieux à l'objectif de performance. Les exigences de conception associées à ce stade à ce type de scellement sont retranscrites dans le tableau ci-après.

Tableau 3.4-3 : Exigences et performances attendues et options de conception pour les scellements horizontaux

Exigences / performances	Dispositions de conception	Sous-composant concerné
Pour garantir des propriétés du noyau les plus homogènes possibles, les vides résiduels sont limités au niveau le plus faible possible et raisonnable.	Mise en place du noyau argileux sous forme de pellets et de poudre d'argile (gonflante ou mélangée) ⁷⁶ .	Noyau argileux
La pression de gonflement du noyau favorise une limitation des déformations des argilites à son contact et la cicatrisation hydraulique des fractures des argilites endommagées par fermeture mécanique.	<ul style="list-style-type: none"> - Choix d'une densité de mise en place adaptée à la nature minéralogique de l'argile gonflante. - Longueur minimale du noyau égale à deux fois le diamètre excavé de l'ouvrage ou 20 m 	
Pour éviter que le revêtement ne constitue une voie de circulation préférentielle d'eau venant court-circuiter le noyau argileux, sa continuité doit être interrompue.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Option de référence</u> : Dépose partielle du revêtement au droit du futur noyau argileux sur une longueur cumulée d'au moins 4 m. Les zones de dépose seront remplies avec un matériau similaire à celui du noyau argileux ▪ <u>Variante</u> : Réalisation de 3 à 5 coupures hydrauliques radiales venant interrompre la continuité de la zone fracturée connectée (ZFC) et la continuité du revêtement laissé en place. 	Composant situé entre le noyau et les argilites en paroi
La perturbation chimique issue des portions de revêtement ou des anneaux porteurs au contact et à proximité du noyau argileux doit être limitée au maximum.	Les portions de revêtement laissées en place seront de type béton « bas pH » (jusqu'à une distance au moins égale à un diamètre de l'ouvrage de part et d'autre du noyau).	
Un noyau en argile gonflante doit être confiné mécaniquement, afin de permettre à la pression de gonflement du noyau de s'établir pendant la resaturation et de s'y maintenir tout au long de son évolution.	Mise en place de massifs d'appui en béton de part et d'autre du noyau argileux et dont le dimensionnement (longueur, géométrie, ancrage éventuel) : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dépend de la pression de gonflement du noyau et des charges de fluides de part et d'autre. ▪ Prend en compte la dégradation chimique du béton. ▪ Permet une stabilité et une durabilité aussi grande que possible. 	Massifs d'appui
La perturbation chimique du noyau argileux doit être limitée au maximum.	Utilisation de formulation de béton de type bas pH.	

⁷⁶ Une mise en place du noyau avec des briques d'argile compactée constitue une alternative.

3.4.2 Retour d'expérience sur les performances des scellements

L'évaluation de la performance de scellements à noyau à base d'argile fait intervenir les « composants » suivants (voir la figure suivante) :

- le noyau ;
- le composant situé entre le noyau et les argilites en paroi, constitué le cas échéant des portions de revêtement laissées en place et du matériau argileux permettant de remplir les zones de dépôt de revêtement ;
- la zone d'argilites endommagées en paroi d'ouvrage ;
- les massifs d'appui en béton bas pH (en fonction des besoins de confinement mécanique du noyau) ;
- les coupures hydrauliques (dans l'option variante des scellements horizontaux) qui interrompent la continuité du revêtement et des argilites en paroi.

L'Andra a réalisé d'ores et déjà un grand nombre d'essais et de simulations en lien avec les scellements. Les configurations testées ne préjugent pas de la conception des scellements qui sera *in fine* mise en œuvre (typiquement à partir de 2070 pour de premiers scellements horizontaux et à l'horizon 2150 pour les scellements verticaux et inclinés). Elles apportent un retour d'expérience par composants, à la fois sur les techniques possibles de réalisation et sur les performances qui peuvent être obtenues.

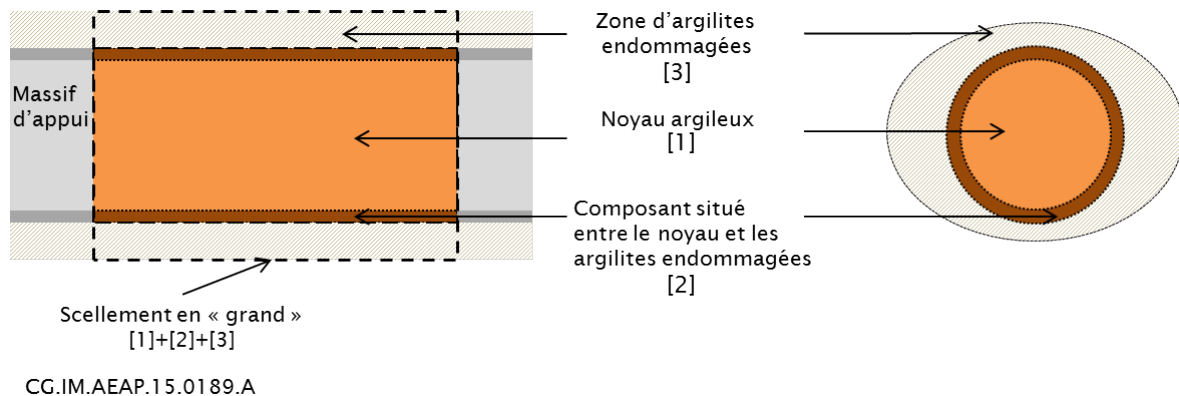


Figure 3.4-2 : Les « composants » entrant dans la performance hydraulique des scellements

3.4.2.1 Les performances associées au noyau argileux

Des techniques de mise en place du noyau argileux éprouvées

Sur la base du retour d'expérience de nombreux essais et maquettes réalisés à l'international et au Laboratoire souterrain, jusqu'à des échelles pluri-métriques, l'Andra a acquis une solide connaissance des matériaux argileux gonflants et des ouvrages à base de ces matériaux. Ce REX indique qu'une perméabilité inférieure à 10^{-11} m/s peut être raisonnablement obtenue avec différents types d'argile gonflante (pure ou mélangée), suivant un large domaine de densité sèche à la mise en place, et suivant diverses méthodes de mise en forme et de mise en place du matériau argileux.

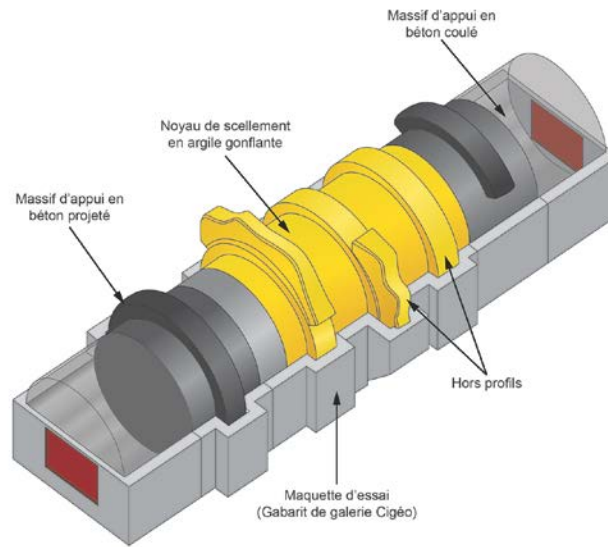
▪ Les ouvrages horizontaux

La faisabilité de la mise en place d'un noyau d'argile gonflante a d'ores et déjà été démontrée expérimentalement dès le début des années 2010 jusqu'à une échelle verticale de 5 à 6 mètres pour ce qui concerne les ouvrages horizontaux. Plus récemment (2014), on peut citer :

- l'essai NSC (pour « Noyau de Scellement ») d'évaluation de la performance du noyau et de l'interface noyau/argilites au Laboratoire souterrain, à une échelle $\frac{1}{2}$ de ce que serait un ouvrage de fermeture horizontal dans Cigéo. Cet essai démontre la faisabilité de la mise en place du noyau

en briques compactées, avec une gestion des interfaces au travers de l'utilisation de mélange de pellets et de poudre de bentonite ;

- l'essai technologique « Full Scale Sealing » (FSS) de construction d'un scellement horizontal à pleine échelle, réalisé en surface, par une méthode industrielle et dans des conditions de température et d'hygrométrie représentatives des conditions du stockage. Cet essai a apporté notamment des enseignements significatifs sur (i) la formulation du matériau à base d'argile gonflante, (ii) la mise en place du noyau argileux à pleine échelle, avec par ailleurs des hors profils représentant des hétérogénéités de la paroi des argilites au droit des revêtements retirés liées par exemple à une purge d'une partie de la ZFC lors de leur retrait, et (iii) l'atteinte de densités sèches à la mise en place répondant aux spécifications de la perméabilité et de la pression de gonflement.



C.IM.0EKS.15.0171.A



Figure 3.4-3 : Principe de conception de l'essai FSS

Les résultats obtenus dans FSS constituent d'ores et déjà des avancées majeures dans la démonstration industrielle de la mise en place d'un scellement à pleine échelle. Le retour d'expérience en termes de formulation du matériau et de dispositions constructives plus adaptées, notamment pour la partie sommitale du noyau argileux, est une base importante pour les prochaines itérations qui constituent les démonstrateurs de scellement de galerie et de scellement de descendrière à pleine échelle dans Cigéo, prévus dans le plan de développement des composants du projet Cigéo (PDD) (28), plus particulièrement dès la phase industrielle pilote.



Figure 3.4-4 : Essai de réalisation de scellement

▪ **Les ouvrages en puits**

La verticalité est une aide à la mise en place. Le retour d'expérience de la mise en place de scellement du petit puits du Laboratoire souterrain de Mol (Belgique) et du puits d'accès du Laboratoire souterrain de l'AECL (Canada) montre la faisabilité de la solution verticale.

La capacité d'atteinte d'une performance hydraulique qui contribue à limiter les écoulements dans les ouvrages

Compte tenu des grandes sections à remplir (jusqu'à 100 m² dans les descenderies) et du rôle majeur des scellements des liaisons surface-fond, l'Andra fixe un objectif de perméabilité homogénéisée à saturation du noyau et de son interface avec les autres matériaux de l'ordre de 10⁻¹¹ m/s pour les scellements verticaux ou inclinés ; une perméabilité supérieure, de l'ordre de 10⁻⁹ m/s, apparaît pertinente pour les scellements horizontaux. Comme l'illustre la figure ci-dessous, des perméabilités plus faibles n'amèneraient pas de gain sur la perméabilité en grand des scellements, compte tenu des caractéristiques hydrauliques des argilites en paroi.

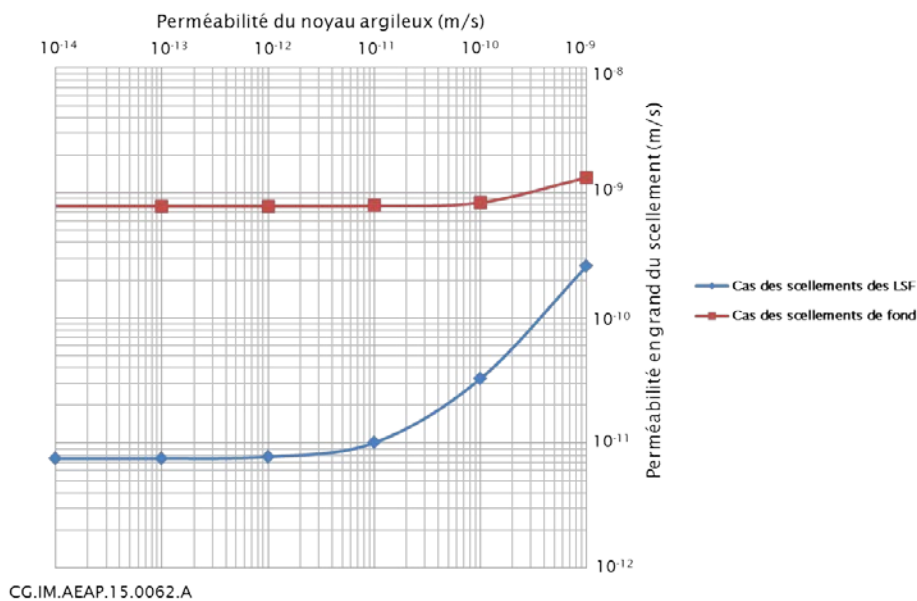


Figure 3.4-5 : Influence de la perméabilité du noyau argileux sur la perméabilité en grand des scellements

L'essai FSS, de par les nombreux essais à l'échelle métrique, montre que plusieurs formulations à base de pellets d'argile gonflante permettent d'atteindre un niveau de performance hydraulique de 10^{-11} m/s. Toutefois, ni une saturation du noyau en grand ni une évaluation de sa performance hydraulique n'ont été retenues compte tenu du fait que les phénomènes et paramètres recherchés sont inaccessibles à l'échelle de temps de l'essai. Ces aspects font l'objet d'autres essais complémentaires à FSS et à plus petite échelle. On peut citer :

- l'expérimentation REM en laboratoire de surface qui doit permettre de vérifier la faisabilité de resaturer le mélange utilisé dans FSS et d'analyser le comportement du mélange de pellets lors d'une resaturation à une échelle au moins métrique (sur le plan hydromécanique et vis-à-vis des gaz). Les différents tests qui seront réalisés dans le cadre de cet essai permettront également d'étudier la sensibilité à différentes eaux de resaturation du mélange de bentonite (eaux de site, eaux synthétiques, eaux de béton pour différents pH) ;
- l'essai NSC à plus petite échelle comparé à FSS, réalisé dans le Laboratoire souterrain : à l'horizon 2020, la saturation artificielle du noyau de NSC sera complète, et sa performance hydraulique évaluée. D'ici là, un suivi hydromécanique du noyau, du massif en béton bas pH et des argilites en paroi est réalisé.

Une contribution du noyau à la cicatrisation des argilites endommagées en paroi

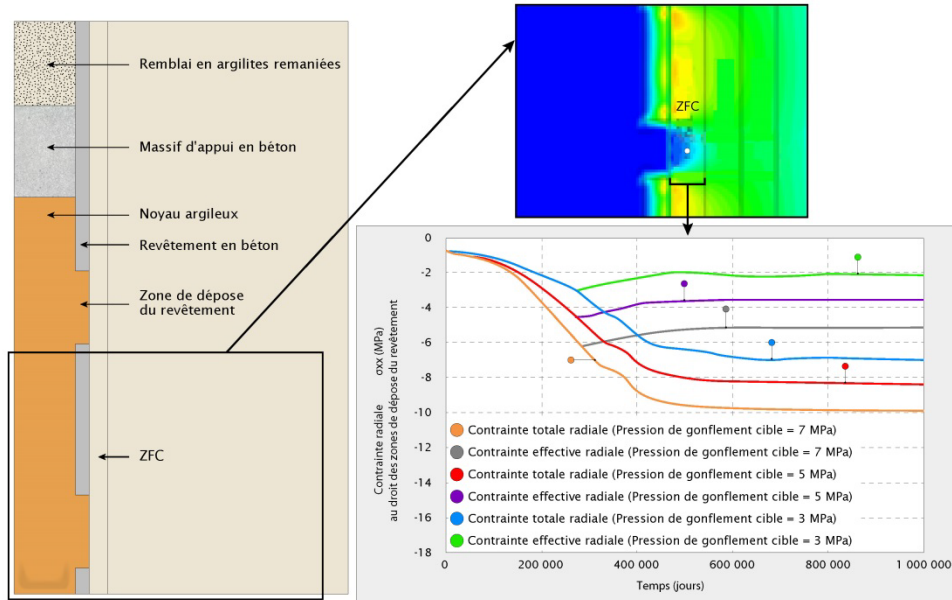
Le développement et le maintien d'une pression de gonflement du noyau argileux d'au moins quelques mégapascals serait favorable à la limitation des déformations des argilites au contact du noyau argileux, à la fermeture mécanique des fractures de la ZFC (dans l'UA) et à sa cicatrisation (réduction de sa perméabilité) en lien avec la resaturation.

La pression de gonflement doit être limitée à la contrainte effective naturelle des argilites (de l'ordre de 7 MPa) pour ne pas y engendrer des désordres mécaniques. De même, elle doit pouvoir être accommodée par les massifs d'appui en béton de part et d'autre du noyau en argile gonflante, de manière à limiter fortement les déformations aux extrémités du noyau et à garantir ainsi un gonflement le plus homogène possible.

Comme indiqué plus haut, l'essai FSS a permis la réalisation de formulations adaptées au contexte de Cigéo et capables de développer une pression de gonflement à saturation de l'ordre de 3.5 à 4 MPa à l'échelle décimétrique. Les résultats de l'essai REM en cours permettront de vérifier que le passage de l'échelle décimétrique à l'échelle métrique n'a pas d'incidence sur le comportement hydromécanique du mélange de bentonite obtenu dans FSS (homogénéité du comportement et atteinte de la saturation et de la pression de gonflement visée). L'appréciation du caractère favorable d'une telle pression de gonflement de 3.5 à 4 MPa renvoie :

- aux travaux sur le fonctionnement hydromécanique intégré des scellements (représentation de l'ensemble {noyau argileux + argilites + massifs d'appui en béton + portions de revêtement). Des simulations numériques sont en cours de réalisation. Ces travaux permettront *in fine* :
 - ✓ d'évaluer :
 - le transitoire de resaturation des différents composants en lien notamment avec la présence de vide de mise en place et de la montée de la pression de gonflement ;
 - les efforts induits sur l'argilite en champ proche, sur les tronçons de revêtement laissés en place et sur les massifs d'appui en lien avec le frottement aux interfaces et le fluage des argilites ;
 - le rééquilibrage hydromécanique après saturation complète du noyau sous l'effet de la recharge hydraulique ;
 - et, à terme, les effets du comportement spécifique à double-porosité du mélange de pellets et de la dégradation chémo-mécanique progressive des composants en béton ;
 - ✓ d'apporter des précisions sur le domaine de pression de gonflement du noyau favorable en termes de (i) de déformations des argilites et *in fine* de fermeture mécanique et de cicatrisation des fractures de la ZFC et (ii) de déplacements longitudinaux des massifs d'appui avec pour effet une diminution locale de la pression de gonflement (en lien avec la garantie du maintien d'une perméabilité de la ZFC d'au plus 10^{-9} m/s) ;

- aux résultats de l'essai NSC en cours qui apporteront des éléments d'appréciation sur la performance hydraulique et le fonctionnement hydromécanique d'un scellement en conditions *in situ* ;
- aux travaux en cours sur la capacité de cicatrisation de la ZFC en fonction de la déformation en extension ;
- à la conception et aux performances mécaniques des massifs d'appui.



CG.IM.AEAP.15.0063.A

Figure 3.4-6 : Contrainte de compression effective dans la ZFC en fonction du temps et pour différentes pressions de gonflement du noyau argileux

3.4.2.2 Les performances associées au composant situé entre le noyau et les argilites endommagées

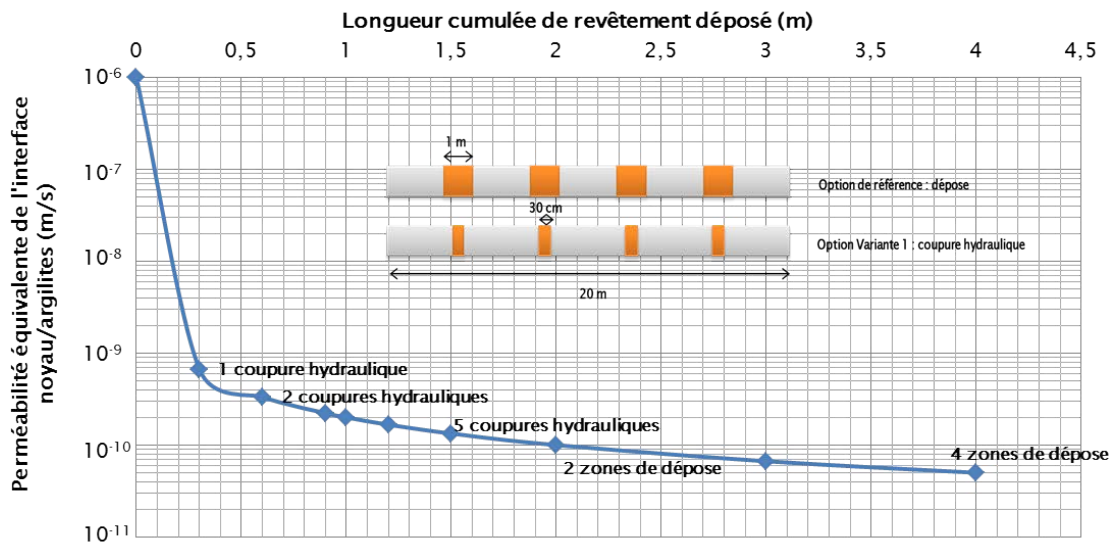
Des concepts qui confèrent des marges de robustesse

▪ Cas des scellements verticaux ou inclinés

Dans les scellements des liaisons surface-fond (LSF), la dépose du revêtement sur tout le linéaire du noyau permet un contact direct avec les argilites, sauf si des portions de revêtement sont laissées en place par nécessité. Dans ce cas l'analyse est la même que dans le cas des scellements horizontaux (voir ci-après).

▪ Cas des scellements horizontaux

Dans l'option de référence comme dans l'option variante, le composant situé entre le noyau et les argilites en paroi est constituée d'une succession de portions de revêtement et de matériau argileux. La figure ci-dessous montre que sa perméabilité équivalente est conforme à l'objectif de performance (inférieure à 10^{-9} m/s) dès quelques décimètres de dépose du revêtement, soit l'équivalent de l'épaisseur d'une coupure hydraulique. La réalisation de 4 zones de dépose d'épaisseur métrique dans l'option de référence ou de 3 à 5 coupures hydrauliques pour l'option variante permet ainsi d'atteindre l'objectif visé concernant ce composant.



CG.IM.AEAP.15.0064.A

Figure 3.4-7 : Perméabilité équivalente du composant entre le noyau et les argilites en fonction du maintien/dépose du revêtement

Des techniques de réalisation du composant entre le noyau et les argilites endommagées qui garantissent l'atteinte des performances

Les concepts de scellement nécessitent de pouvoir (i) déposer totalement ou partiellement le revêtement au droit du futur scellement et retravailler la paroi d'argilites (purgé, surfacage) afin de lui conférer un état de surface le plus régulier possible, (ii) remplir ces zones de dépose avec l'argile gonflante avec une bonne homogénéité, (iii) réaliser des coupures hydrauliques pour l'option variante des scellements de fond.

▪ **Dépose du revêtement**

Des dispositions techniques sont actuellement étudiées en lien avec celles du creusement, du soutènement et du revêtement des ouvrages. L'objectif est de pouvoir déposer le revêtement tout en minimisant l'évolution de la zone d'argilites en paroi (réactivation et propagation de fractures).

Au droit des futurs scellements des LSF, les propriétés mécaniques des argilites sont favorables à la limitation d'une zone endommagée et, donc au retrait des revêtements. Un essai de dépose de cintres dans la galerie au niveau -445 mètres (USC) est en cours de réalisation au Laboratoire souterrain. La très bonne tenue constatée des terrains non soutenus est un élément favorable du point de vue de la mise en œuvre technologique.

Pour les scellements horizontaux, un essai de dépose du revêtement est prévu dans l'UA pour vérifier et évaluer les conséquences mécaniques sur les argilites, particulièrement l'extension et les propriétés de la zone d'argilites fracturées.

Parallèlement aux essais de dépose, la mise au point et le test d'un procédé de « reprise » du parement d'argilite après la dépose du revêtement seront réalisés.

▪ **Remplissage des zones de dépose du revêtement avec l'argile gonflante**

L'objectif de perméabilité visé nécessite de pouvoir remplir les zones de dépose avec l'argile gonflante et ce avec une bonne homogénéité et en minimisant les vides au niveau le plus faible possible. Cette problématique renvoie à celle sur la mise en place du noyau argileux à pleine échelle déjà abordée précédemment dans la section relative au noyau argileux. L'essai FSS a montré les difficultés pour remplir les zones de dépose du revêtement, mais a également permis de tirer des enseignements sur la formulation de l'argile gonflante et la technique de mise en place adaptées à ces zones. La réalisation

des démonstrateurs de scellements de descenderie et de galerie dans Cigéo prévus dans le PDD (28) permettra de les tester.

Une formulation de béton qui limite la perturbation alcaline

La perturbation alcaline dans le noyau argileux issue de la dégradation des massifs d'appui et des portions de revêtement en béton bas pH, à 100 000 ans, se traduit à l'interface avec les massifs d'appui par une zone fortement reminéralisée (dissolution complète de la montmorillonite et précipitation d'illite, de saponite, de quartz et de calcite) et une zone faiblement perturbée (dissolution plus ou moins importante de phases primaires minoritaires). Les extensions de ces zones sont respectivement d'ordre décimétrique et métrique. La quantité totale de minéraux gonflants dissoute est inférieure à 10 %.

Dans les argilites, la zone fortement perturbée, d'ordre pluri-centimétrique, est caractérisée par la dissolution de nombreux minéraux des argilites et la précipitation de saponite. Au-delà une zone plus faiblement perturbée marquée par la dissolution plus ou moins importante des phases primaires carbonatées (sidérite, dolomite) et la formation de calcite s'étend sur un peu moins de 2 mètres.

Dans les coupures hydrauliques (option variante des scellements de fond), le bilan de l'évolution des teneurs en smectites (minéraux gonflants) à 100 000 ans montre qu'environ 10 % de la smectite initiale est dissoute au droit du revêtement. Au-delà du revêtement, au droit des argilites, aucune évolution n'est notée.

3.4.2.3 Les « performances » associées aux argilites en paroi

Un endommagement initial caractérisé

Les mesures acquises au Laboratoire souterrain au travers de différentes expérimentations mettant en œuvre diverses configurations (en termes de diamètre excavé, de profondeur et d'orientation de galerie, de méthode de creusement et de type de soutènement, ...) montrent que :

- l'endommagement est principalement lié au comportement mécanique de la roche, à la contrainte in situ (i.e. à la profondeur des ouvrages), et à la méthode d'excavation/soutènement ;
- la structure générale de l'endommagement est la même quel que soit le type d'ouvrage (de 10 centimètres à 8 mètres de diamètre excavé) ;
- la géométrie de l'endommagement est anisotrope et fonction de l'orientation de la galerie par rapport aux contraintes principales horizontales, et son extension évolue linéairement en fonction du diamètre excavé.

▪ **Au droit des scellements de fond**

Dans l'UA où sont mis en place les scellements horizontaux, et où la résistance des argilites est la plus faible du Callovo-Oxfordien, on observe, suite au creusement et en paroi des excavations, un endommagement localisé très important, avec la formation de deux zones :

- une zone pariétale caractérisée par un réseau dense de fractures interconnectées et mixtes (extension et cisaillement), appelée « Zone Fracturée Connectée » (ZFC) ;
- Une zone située au-delà de la ZFC et caractérisée par des fractures de cisaillement peu ou pas interconnectées, dite « Zone de Fracturation Discrète » (ZFD).

Dans la ZFC, les perméabilités à l'eau calculées à partir des tests hydrauliques réalisés au Laboratoire souterrain, varient entre 10^{-5} m/s et 10^{-10} m/s avec parfois des valeurs plus basses. Des perméabilités inférieures à 10^{-12} m/s ont été mesurées sur des échantillons prélevés entre les fractures, ce qui signifie que la valeur de perméabilité à l'eau de 10^{-5} m/s est représentative de la perméabilité des fractures.

Au-delà de la ZFC, la ZFD dans l'UA est caractérisée par des perméabilités à l'eau mesurées entre 10^{-10} et 10^{-12} m/s.

▪ **Au droit des scellements des LSF**

Dans l'USC où sont mis en place les scellements des LSF, et où la résistance des argilites est élevée, on observe peu d'endommagement lors du creusement, avec quelques fissures d'extension (pluri centimétrique) et de la microfissuration.

Les observations réalisées lors de la caractérisation initiale en 2005 dans le Laboratoire souterrain autour de la galerie à -445 m, confirmées par les mesures effectuées à proximité dans le puits principal (SMR et REP), montrent une diminution de la perméabilité entre 10^{-11} et 10^{-13} m/s dans les deux premiers mètres de la roche. Cela signifie qu'il n'y a pas de formation d'une ZFC mais uniquement celle d'une ZFD.

Une zone d'argilites endommagées qui évolue vers la cicatrisation de ses fractures

Après l'excavation et la décharge mécanique conduisant à l'endommagement initial, la zone d'argilites endommagées en paroi d'ouvrage est susceptible d'évoluer du point de vue de son extension ou du point de vue de ses propriétés hydrauliques, en lien avec divers phénomènes et sollicitations.

▪ **Une fissuration hydrique aux conséquences limitées**

Lors de la phase d'exploitation, du fait que le revêtement des LSF et des galeries est drainant au droit du Callovo-Oxfordien, la ventilation s'accompagne d'une désaturation des argilites. Celle-ci se produit essentiellement dans la zone déjà endommagée par le creusement et peut induire ainsi une ouverture des fissures préexistantes du fait des phénomènes de retrait si l'état de contrainte le permet.

Dans l'UA, la fissuration hydrique qui en résulte est comparable à une ZFC et elle reste confinée à l'intérieur de celle-ci, sans y augmenter significativement l'endommagement. Dans l'USC, où il n'y a pas de ZFC, celle-ci pourrait alors s'y former. Comme son extension ne serait pas importante en lien avec la faible désaturation de la ZFD (phénomène de peau), elle serait purgée après le retrait du revêtement.

In fine, la fissuration hydrique ne modifie pas les propriétés hydrauliques des argilites endommagées ni leur structure.

▪ **Une décharge mécanique au droit des zones de dépose gérée par conception**

La décharge mécanique consécutive à une dépose du revêtement est susceptible d'entraîner une réactivation des fissures et fractures de la zone d'argilites endommagées. De ce fait, un ensemble de dispositions de conception est spécifié pour la limiter autant que possible.

▪ **Une évolution en lien avec le comportement différé des argilites qui reste limitée**

Dans l'USC (scellements verticaux et inclinés), six ans après l'excavation, les mesures de perméabilité autour de la galerie à -445 mètres montrent une très légère évolution avec l'apparition d'une zone à forte perméabilité au parement (jusqu'à 0,5 mètre) et une évolution plus marquée au radier (jusqu'à 1 mètre). Cette évolution de l'endommagement dans l'USC avec l'apparition de zones à forte perméabilité doit toutefois être relativisée au regard du fait que :

- (i) ces zones ne sont pas systématiquement observées et la densité de fracturation y est faible (quelques fractures observées dans chaque forage) ;
- (ii) la galerie à - 445 mètres a une géométrie spécifique (fer à cheval) qui engendre une concentration de contraintes et amplifie la fracturation, et est faiblement soutenue ;
- (iii) Il n'y a actuellement pas d'information sur la connectivité parallèlement à l'axe de la galerie des fractures observées mais il est peu probable qu'il y ait continuité.

Dans l'hypothèse où le développement de la zone fracturée n'est pas un artefact, le développement des fissures au cours du temps pourrait être lié à la désaturation et/ou à la rupture différée de l'argilite liée aux déformations viscoplastiques. Dans les puits de Cigéo qui auront un revêtement rigide, les déformations étant empêchées, la propagation de fractures sera beaucoup plus difficile que pour un ouvrage non ou faiblement revêtu comme c'est le cas de la galerie à -445 m, et devrait au plus correspondre à un phénomène de peau. Les dispositions de conception des scellements de liaison

surface-fond prévoient, après dépose du revêtement, de traiter la surface d'argilites qui apparaîtrait altérée ou fracturée (purge, surfaçage, ...).

Après la dépose du revêtement et la mise en place du noyau argileux, celui-ci devrait être suffisamment rigide pour confiner les argilites et éviter le développement d'un endommagement supplémentaire.

Dans l'UA (scellements horizontaux), le phénomène de rupture différée devrait avoir un impact limité sur l'endommagement. Cela est corroboré par des mesures réalisées au Laboratoire souterrain où après 5 ans de suivi pour les ouvrages avec soutènement « souple », on n'observe pas d'évolution significative, les fortes conductivités hydrauliques restant dans la zone fracturée connectée (ZFC) initiale.

La description ci-dessous sur le comportement différé des argilites (dans l'USC comme dans l'UA) sera consolidée par les actions planifiées par le PDD (28), à savoir :

- la poursuite des observations au Laboratoire souterrain d'ici 2018 puis sur la période 2018-2024 qui permettront :
 - ✓ de suivre l'évolution de l'endommagement autour des galeries ;
 - ✓ de réduire notablement les incertitudes actuelles sur les vitesses de déformation différée des argilites à long terme ;
 - les nouveaux essais sur le comportement différé qui devraient permettre de mieux comprendre et caractériser la rupture différée sur échantillon et de clarifier l'évolution potentielle de la résistance des argilites du Callovo-Oxfordien au cours du temps ;
 - la prise en compte des nouvelles connaissances sur le comportement différé dans les simulations hydromécaniques intégrées des scellements.
- **Une capacité de cicatrisation hydraulique des argilites démontrée**

L'essai à la plaque CDZ réalisé au Laboratoire souterrain a permis de mesurer les effets de la fermeture mécanique des fractures et les effets de l'auto-colmatage par resaturation sur la perméabilité de la ZFC et de la ZFD. Il montre que l'application d'une pression à la paroi d'une galerie se traduit par une diminution de la perméabilité de la zone fracturée du fait de la fermeture géométrique des fractures. Cette diminution a atteint 3 ordres de grandeur sous 4 MPa de chargement pour la zone de plus forte perméabilité intrinsèque initiale. D'autres tests réalisés lors des paliers de chargement (respectivement à 2 MPa, 3 MPa, 4 MPa, et après déchargement) montrent qu'un chargement à 3 MPa conduit à une réduction de conductivité hydraulique de l'ordre de 1 à 3 ordres de grandeur dans les intervalles sous chargement.

Les observations dans CDZ montrent également que parallèlement à la fermeture géométrique des fractures, se déroule un autre processus tendant à la réduction de la perméabilité : l'auto-colmatage lié à la resaturation de la zone d'argilites endommagées. Ce dernier résulte du réarrangement des minéraux et *in fine* de la porosité dans et autour des fractures, par (i) le gonflement interfoliaire des minéraux smectites, (ii) le gonflement inter-particulaires par effet osmotique, (iii) l'obstruction des fissures par agrégation de particules. Le rapprochement mécanique des épontes des fissures favoriserait ce phénomène.

Quelle que soit la nature de la fracture (cisaillement, extension ou créée artificiellement par fraisage), l'auto-colmatage a été observé et peut donc se développer aussi bien dans la ZFC que dans la ZFD. Une diminution de perméabilité à l'eau de 3 à 4 ordres de grandeur du fait de l'hydratation est notamment observée au niveau de l'expérimentation CDZ, dans les intervalles identifiés comme les plus perméables (c'est-à-dire de perméabilité initialement supérieure à 10^{-7} m/s). On constate dans ces dernières rapidement une stabilisation de la perméabilité à une valeur de l'ordre de 10^{-10} m/s.

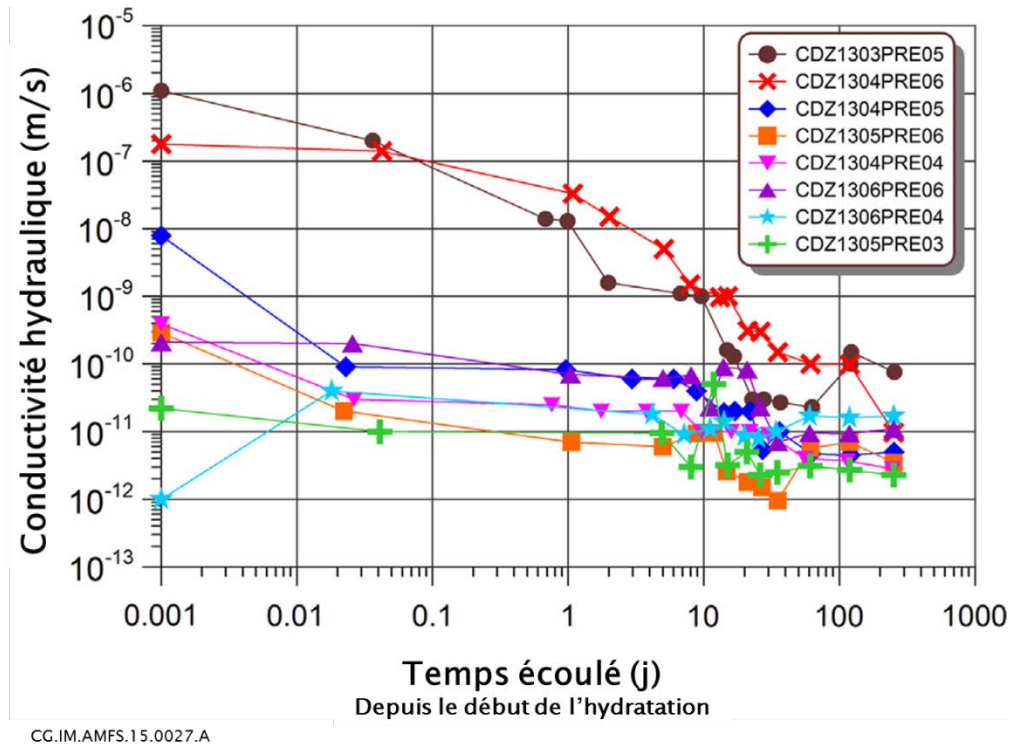


Figure 3.4-8 : Evolution des conductivités hydrauliques mesurées dans l'expérience CDZ depuis le démarrage de la resaturation pour les 8 intervalles testés périodiquement

Ainsi, les argilites endommagées (ZFC et ZFD) devraient se cicatriser et recouvrir une faible perméabilité à l'eau (inférieure à 10^{-9} m/s) compatible avec les objectifs de performance des scellements (en particulier les scellements de fond) sous l'effet :

- de la fermeture mécanique des fractures sous le chargement mécanique d'un noyau à base d'argile gonflante : il est en effet établi par simulation qu'une pression de gonflement du noyau argileux se concrétise bien en termes de compression des argilites fracturées au droit des zones de dépôt du revêtement, et ce avec un bon rapport, et donc in fine en termes de réduction de la perméabilité ;
- de l'auto-colmatage des fractures suite à leur resaturation en eau.

Les incertitudes résiduelles à ce stade sur la cicatrization des argilites endommagées au droit des scellements résident principalement :

- dans la manière de prendre en compte l'auto-colmatage dans les évaluations (par exemple, jusqu'à quelle ouverture de fracture ce processus est-il pérenne), mais aussi dans le fait que sa caractérisation dans l'USC demande à être poursuivie (lien avec la minéralogie). Des essais actuellement en cours au Laboratoire souterrain ou en surface permettront de réduire ces incertitudes ;
- sur le couplage hydromécanique entre un noyau à base d'argile gonflante et les argilites et, plus précisément, sur la capacité du noyau à reproduire par sa pression de gonflement l'effet mécanique bénéfique à la récupération d'une faible perméabilité.

3.4.2.4 Les performances associées au massif d'appui

Des concepts de massifs d'appui dimensionnés pour une durabilité et une stabilité à long terme du scellement

Dans le cadre de travaux de dimensionnement, l'Andra étudie différentes solutions techniques de massifs d'appui en béton bas pH, en tenant compte des aspects technologiques, de la maîtrise du comportement THMC sur le long terme, et des facteurs économiques. Ces solutions couvrent :

- des concepts de massif d'appui avec un ou plusieurs redans dans le revêtement (Figure 3.4-9 - (a)) ;
- un concept de massif d'appui à un redan radial pluri-métrique dans les argilites sur quelques mètres (Figure 3.4-9 - (b)).

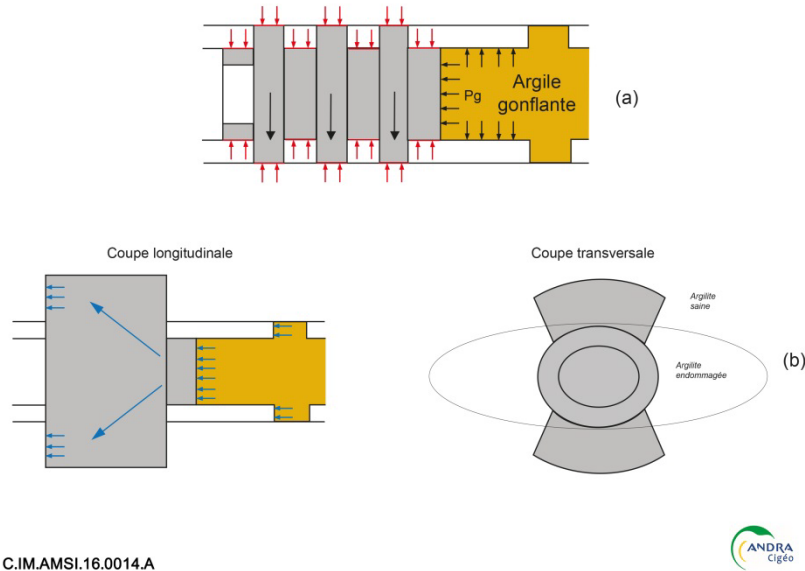


Figure 3.4-9 : Plans schématiques de concepts de massif d'appui actuellement à l'étude : (a) à un ou plusieurs redans ; (b) à un redan ancré dans les argilites

Les travaux se poursuivent dans le cadre du plan de déroulement des études et essais (PDD) (28) des composants de Cigéo : faisabilité technologique des différents types de redans, réduction des incertitudes sur le frottement à l'interface béton/argilites et sur son évolution dans le temps.

Une faisabilité de la mise en place du béton acquise

L'essai FSS de construction d'un scellement pleine échelle valide la faisabilité de la mise en place de volumes de béton bas pH significatifs en configuration de galerie avec notamment des caractéristiques mécaniques conformes à celles attendues et mesurées sur échantillon.

Deux techniques de mise en place différentes associées à deux formulations de béton bas pH (valeur proche de 10.5) différentes ont été mises en œuvre dans des conditions représentatives du stockage (température et hygrométrie ; contraintes d'acheminement et de mise en place du béton).

Le massif amont a été réalisé de manière continue avec un béton auto-plaçant, par passes successives et avec un volume de béton mis en jeu de l'ordre de 241 m³. En fin de coulage, un coulis bas pH a été injecté pour combler le volume de vides présents (clavage). Celui-ci s'est avéré limité. Les mesures et les observations effectuées pendant le coulage du béton et après le décoffrage montrent notamment le respect du critère thermique ($T < 50^{\circ}\text{C}$), la régularité du béton et le remplissage total de l'excroissance (qui simule une zone de dépose du revêtement et un éventuel hors profil).

Le second massif d'appui a été réalisé en utilisant la technique du béton projeté et a mis en jeu un volume de béton d'environ 271 m³. Le pic thermique à cœur était à 67°C, soit 17°C au-dessus de la spécification. De même, il est probable que certaines zones en partie basse du massif ne montrent pas une excellente accroche entre deux couches, du fait des reprises de bétonnage entre chaque couche verticale (mauvaise purge du rebond, avant reprise du bétonnage). Toutefois, le retour d'expérience tiré en termes d'adaptation de la formulation du béton bas pH et de la méthode de mise en œuvre par projection (durée de la projection, épaisseur des couches, ...) est significatif.

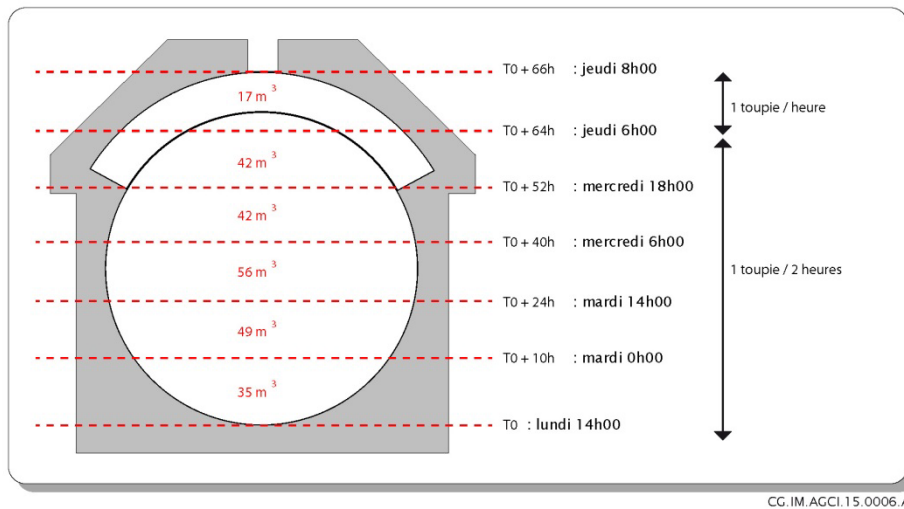


Figure 3.4-10 : Schémas de principe de la technique de mise en place du massif d'appui par béton auto-plaçant

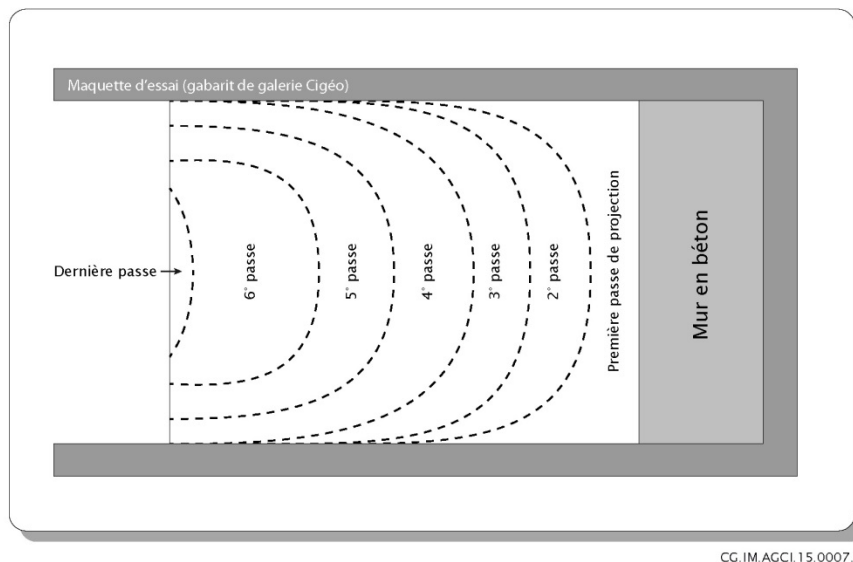


Figure 3.4-11 : Schémas de principe de la technique de mise en place du massif d'appui par projection de béton

Une formulation de béton qui limite la dégradation du béton et la perturbation alcaline

L'extension de la dégradation sous eau des massifs d'appui en béton bas pH est actuellement appréhendée par des simulations numériques en transport réactif. Les résultats montrent qu'elle est bien moindre que celle avec un béton classique type CEM I. La transformation se traduit à 100 000 ans :

- à l'interface avec les argilites, par une zone fortement perturbée, d'extension d'environ 20 centimètres, et caractérisée par la dissolution du CSH0.8 et la précipitation massive de quartz et de calcite ; et au-delà, une zone plus faiblement perturbée d'extension inférieure à 2 mètres et marquée par la dissolution du quartz initial, la précipitation de saponite et le maintien de la phase CSH ;
- à l'interface avec le noyau argileux, par également deux zones successives : la première d'extension décimétrique caractérisée par la dissolution du CSH0.8, C3FH6 et du quartz initiaux, et la seconde d'extension métrique caractérisée par la dissolution du quartz et la formation d'ettringite en petite quantité sans modification importante des minéraux initiaux.

Les massifs d'appui devraient donc conserver leurs propriétés mécaniques sur de longues durées, à l'exception éventuelle des interfaces où les évolutions minéralogiques peuvent être significatives mais se traduisent entre autres dans le béton par une précipitation tendant à réduire la porosité et donc à consolider le matériau. Des essais de dégradation sous eau de bétons bas pH sont prévus, et permettront d'appréhender l'évolution des propriétés mécaniques en lien avec la dégradation chimique.

3.4.2.5 Les performances associées aux coupures hydrauliques

Cette section concerne l'option variante des scellements de fond. Celle-ci consiste à laisser en place le revêtement et à creuser 3 à 5 saignées de 30 centimètres de large, remplies de matériau à base d'argile gonflante. Dans cette option, l'atteinte de la performance du scellement ne mobilise pas le processus d'auto-colmatage des argilites.

La réalisation des saignées

La technique de réalisation des saignées est le creusement à la scie (en plusieurs sections comme testée au Laboratoire souterrain), ou une technique équivalente. Du point de vue de la faisabilité technologique de creusement, l'Andra dispose d'un retour d'expériences de réalisation de telles saignées dans un premier temps dans le Laboratoire souterrain du Mont-Terri (Expérimentation EZ_A), puis dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

La faisabilité technologique du creusement de saignées de 30 centimètres d'épaisseur jusqu'à une profondeur de 2,5 mètres est aujourd'hui acquise. La dernière saignée complète de cette nature (expérimentation TSS1), réalisée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne en juillet 2011 présente par ailleurs un état de surface satisfaisant et est restée auto-stable depuis lors.

Les résultats de caractérisation des argilites autour de la saignée KEY réalisée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne en 2005 montrant un très faible sur-endommagement des argilites autour de la saignée, et peu/pas de déformations des argilites. Les simulations numériques réalisées corroborent ces constatations.

Le remplissage des saignées

En ce qui concerne la faisabilité du remplissage des saignées et l'atteinte de la performance hydraulique recherchée (perméabilité à saturation maximale de 10^{-11} m/s), l'Andra dispose à ce stade de plusieurs résultats d'essais. Après l'essai de remplissage d'une saignée avec des briques de bentonite compactée dans le laboratoire du Mont-Terri en 2005 (taux de vide satisfaisant limité à quelques pourcents), l'essai SET de remplissage d'une saignée en surface, réalisé fin 2013, apporte des éléments de démonstration complémentaires de la faisabilité technologique selon une méthode industrielle. Cet essai de remplissage d'une saignée de 2,5 mètres de profondeur et de 0,3 mètre de large, réalisé dans des conditions représentatives des conditions d'encombrement et de circulation in situ, a permis de démontrer la faisabilité des opérations suivantes :

- placer à l'aide d'un robot un assemblage stable de briques pré-compactées en partie haute des saignées (voûte) ;
- Remplir la partie basse de la saignée par un mélange pulvérulent (pellets + poudre de bentonite).

La performance hydraulique

Une seule coupure hydraulique de perméabilité à l'eau de 10^{-11} m/s permet d'interrompre suffisamment la continuité du revêtement (de perméabilité élevée) pour obtenir *in fine* une perméabilité à l'eau du « composant entre le noyau argileux et les argilites en paroi » compatible avec l'objectif de performance visé. Il en est de même de la zone d'argilites fracturées connectées (ZFC). Des essais d'interférence au gaz et de traçage à l'hélium de part et d'autre d'une saignée remplie de résine (expérimentation KEY) ont confirmé l'efficacité des saignées vis-à-vis d'une interruption de la connectivité de la zone fracturée connectée (ZFC) lorsque la saignée pénètre dans la zone de fracturation discrète (ZFD), au-delà de la ZFC.

À ce stade, il reste à démontrer la faisabilité de la réalisation de telles coupures hydrauliques à pleine échelle (c'est-à-dire une épaisseur de l'ordre de 30 centimètres et une profondeur de l'ordre de 0,8 fois

le rayon excavé, soit environ 3,5 mètres pour une section d'ouvrage de 65 m²), et capables d'atteindre la performance hydraulique visée. Pour ce faire, dans le cadre du PDD (28), des travaux de développement seront conduits pour adapter les technologies développées dans l'essai SET à l'échelle 1 et dans des conditions opérationnelles. Parallèlement, des essais en laboratoires de surface et souterrain de remplissage de saignées et de suivi de saturation seront réalisés.

3.4.3 Bouchons argileux de fermeture des têtes d'alvéoles HA

3.4.3.1 Options de conception et contribution aux fonctions de sûreté

La fermeture de la tête d'alvéole HA comprend un remplissage à base d'argile (ou bouchon) à l'intrados du chemisage⁷⁷ (ce dernier étant laissé en place). Globalement les contributions de la tête d'alvéole aux fonctions de sûreté après fermeture reposent à la fois sur la longueur de la tête d'alvéole (aussi grande que possible en tenant compte des facteurs techniques et économiques), sur la part de cette longueur remplie d'argile (elle aussi aussi grande que possible ; l'Andra a retenu une longueur minimale de 2 mètres à proximité des colis de déchets) et sur les caractéristiques de l'argile de remplissage : coefficient de diffusion et porosité faibles, vides résiduels limités autant que possible.

La première contribution aux fonctions de sûreté après fermeture concerne la limitation du relâchement des radionucléides (protection de la matrice vitreuse des colis de déchets HA vis-à-vis de l'altération). Il s'agit d'assurer un rôle de tampon vis-à-vis de l'environnement physico-chimique des galeries, plus précisément de se prémunir du risque de propagation/court-circuit du panache alcalin lié à la présence de béton dans le revêtement de la galerie d'accès.

Une autre contribution porte sur le retard et l'atténuation du flux longitudinal de radionucléides et toxiques chimiques. Du fait des conditions diffusives dominantes qui règnent dans l'alvéole HA, plus la longueur de la tête d'alvéole et du matériau argileux qu'elle accueille est grande, plus la part de solutés susceptibles de migrer vers la galerie d'accès est faible, et plus tardive est la date d'occurrence des maxima de débit molaire. En corollaire, pour une longueur de tête d'alvéole donnée, l'atténuation de la quantité de substances entrant dans la galerie d'accès et le retard d'occurrence des maxima sont fonction des performances diffusives des matériaux de remplissage.

Enfin, à l'instar des remblais de galeries (voir plus loin), le remplissage des têtes d'alvéoles contribue à préserver localement les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien : il réduit les vides compressibles susceptibles d'être repris lors de la rupture du chemisage en tête d'alvéole HA.

Il est à noter que la tête d'alvéole HA et son mode de fermeture n'apportent pas de contribution à la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau ».

3.4.3.2 Composition du matériau argileux

En matière de composition du matériau argileux, l'Andra étudie plusieurs options : argilites ou argile gonflante⁷⁸, pures ou en mélange.

Le potentiel de gonflement qu'apporterait l'utilisation d'argile gonflante pure ou son incorporation en mélange favoriserait la récupération des jeux résiduels de mise en place et limiterait le plus possible ses déformations et celles de l'argilite à son pourtour. L'évolution chimique des matériaux à base d'argiles gonflantes au contact de composants métalliques (ce qui est le contexte de la tête d'alvéole HA) est appréhendée par des simulations numériques et par expérimentation. Celles-ci indiquent que les produits de dégradation formés dans l'argile gonflante sont similaires à ceux observés dans les argilites au contact de fer, avec toutefois une intensité moindre de la dégradation. Par ailleurs, les

⁷⁷ La construction d'un tel bouchon ne présente pas de difficulté technologique particulière. Tel que déjà indiqué dans la section précédente relative aux scellements, la faisabilité de la mise en place de noyau d'argile en ouvrage horizontal est déjà démontrée expérimentalement jusqu'à un diamètre de 5 à 6 mètres.

⁷⁸ Comme déjà indiqué plus haut pour les scellements, l'Andra dispose d'un retour d'expérience considérable sur l'argile gonflante. Une grande diversité de types d'argile gonflante, pure ou mélangée à des additifs divers associée à différents modes de mise en forme et différentes sollicitations ont ainsi été évaluées sur les plans thermique, hydraulique, mécanique et chimique, de l'échelle du matériau à celle de l'ouvrage. Ces études soulignent la capacité des argiles gonflantes à s'adapter à différents besoins et conditions d'environnement du stockage.

données issues du programme expérimental, qui s'est majoritairement focalisé sur l'évolution de l'interface fer-argilites, indiquent un domaine de composition de la solution au contact des produits d'interaction fer-argile correspondant à un pH compris entre 6 et 9.

L'utilisation d'argilites remaniées ne sera quant à elle envisageable que si leur compatibilité avec la protection physico-chimique des déchets vitrifiés après leur entreposage en verse est démontrée, en lien avec la perturbation issue de l'oxydation de la pyrite des argilites. Des travaux de caractérisation physico-chimique des argilites entreposées en verse sont en cours.

La sélection de matériaux présentant un pH proche de la neutralité⁷⁹ évitera d'ajouter une cause d'altération potentielle du verre nucléaire.

La définition de la composition du matériau argileux de fermeture de la tête d'alvéole HA se fera en lien avec les études en cours, qui permettront, d'une part de consolider les acquis sur le plan technologique, d'autre part d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement phénoménologique de la tête d'alvéole HA. Ces études s'appuient principalement sur des expérimentations *in situ* et sur des simulations numériques. On peut citer :

- l'essai *in situ* (BHN) de suivi de la saturation naturelle d'un noyau argileux en contact direct avec les argilites et mis en place dans un forage de 75 cm de diamètre (échelle proche de celle de la tête de l'alvéole HA) : il apportera des éléments de démonstration relatifs (i) à la mise en place du matériau argileux en tête d'alvéole et à l'atteinte des spécifications de densité et de limitation des vides résiduels, (ii) à la construction d'un massif d'appui en béton bas pH ;
- les travaux expérimentaux qui visent à consolider les modèles chimiques des bétons bas pH et les processus d'interaction chimique avec les argiles naturelles et remaniées, notamment à partir des essais de corrosion des matériaux ferreux (essais MCO) au Laboratoire souterrain ;
- les travaux qui visent à évaluer finement la mise en charge hydromécanique de la tête d'alvéole, avec une attention particulière portée notamment sur les déformations axiales du matériau argileux et du massif de confinement.

3.4.4 Remblais

Les remblais réduisent autant que possible les vides (compressibles) susceptibles d'être repris lors de la rupture des revêtements : ils limitent un sur-endommagement des argilites autour des galeries de l'installation souterraine et des liaisons surface-fond et contribuent ainsi à préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien.

Les remblais seront constitués par la roche excavée entreposée en verses en attente de sa réutilisation, éventuellement complétée par des additifs.

Pour limiter les déformations mécaniques dans les argilites, on vise à obtenir une compressibilité la plus faible possible et une densité sèche la plus élevée possible. Le remblai sera mis en place de manière à remplir intégralement le volume, notamment en minimisant le vide en partie haute.

3.4.4.1 Une mise en place déjà testée

Sur le plan technologique de la mise en place de remblais à base d'argilites, l'Andra dispose à ce stade d'éléments grâce au démonstrateur de remblayage réalisé en surface à Richwiller. Les principaux objectifs de ce démonstrateur concernaient l'évaluation des caractéristiques *in situ* et en laboratoire des remblais, après plus de deux ans de saturation et ceci comparativement aux caractéristiques obtenues lors des essais de formulation en laboratoire et lors des contrôles réalisés pendant les travaux de remblaiement.

Des remblais constitués d'argilites seules et d'argilites mélangées avec du sable y ont été testés au travers d'un ensemble d'essais permettant leur caractérisation sur les plan géotechnique, hydraulique et mécanique.

⁷⁹ S'il est nécessaire de mettre en place un dispositif de confinement mécanique à l'arrière du matériau de remplissage argileux (cas d'une argile gonflante), l'emploi de matériaux cimentaires sera aussi limité que possible et uniquement avec des formulations de type « bas pH » (donnant des fluides à $\text{pH} \leq 11$).

Les observations réalisées lors du démantèlement du démonstrateur démontrent la faisabilité de la mise en place de remblais à base d'argilites seules ou mélangées avec du sable. En effet on note :

- lors des travaux de remblaiement : un bon contact remblai - parois partout sauf en partie supérieure où des vides de quelques centimètres au plus sont observés, tant pour les argilites mélangées avec du sable que pour les argilites seules ;
- après deux ans de saturation : les vides en partie supérieure sont restés dans les mêmes ordres de grandeur qu'initialement, signe que les remblais n'ont été que très peu affectés par des phénomènes de tassements ou gonflement lors de la phase de saturation.

Les essais réalisés sur échantillon en laboratoire ont montré que l'atteinte de densités sèches de mise en place élevées étaient possibles avec les deux types de remblai (jusqu'à 2 g/cm^3), alors que les essais *in situ* au pénétromètre dynamique établissent le maintien de la compacité des remblais après mise en place et deux ans de saturation, avec cependant une tendance à la diminution en partie supérieure du démonstrateur et des valeurs légèrement supérieure dans le remblai argilites mélangées avec du sable.

3.4.4.2 Une évolution lente des ouvrages favorable à une cicatrisation des argilites en paroi

L'évolution mécanique des ouvrages remblayés est essentiellement contrôlée à moyen terme par les déformations différées du milieu géologique. Dès les premières dizaines à la centaine d'années après la fermeture de la galerie, la resaturation des argilites réactive progressivement le comportement différé des argilites. Tant que le revêtement assure le maintien mécanique de l'ouvrage, la zone d'argilites endommagées continue de se « consolider » comme pendant la période d'exploitation, par la fermeture mécanique des fractures. Parallèlement à la convergence des argilites, les contraintes appliquées sur le revêtement continuent d'augmenter jusqu'à sa rupture. Cette rupture est reprise par le remblai qui empêche ou limite très fortement une décharge de la zone de fracturation.

Du fait d'une faible cinétique de déformation différée des argilites ($< 10^{-11} \text{ s}^{-1}$) et de la rupture progressive et par blocs du revêtement, il en résulte une lente évolution (*i.e.* quasi statique) des galeries, avec notamment de faibles déformations dans les argilites. Ces dernières associées à la compaction de la zone fracturée devraient conduire à la récupération d'une faible perméabilité de la zone fracturée connectée (ZFC) par fermeture mécanique et auto-colmatage.

Il subsiste des incertitudes sur l'évolution mécanique des galeries remblayées en lien avec (i) les propriétés mécaniques des argilites notamment leur comportement différé, (ii) le couplage avec le transitoire hydraulique-gaz (une montée en pression de gaz dans le remblai conduit à une diminution de la saturation en eau, qui pourrait se traduire par une rigidification mécanique et un tassement préjudiciables ; ce phénomène devrait être limité en amplitude et dans l'espace et transitoire), (iii) l'effet de la perturbation alcaline résultant de la dégradation chimique des bétons, sur le matériau de remblai.

VOLUME III – EVALUATION DE SURETE

1

La maîtrise des risques et des incertitudes

<i>1.1</i>	<i>Introduction</i>	<i>198</i>
<i>1.2</i>	<i>L'identification et la gestion des incertitudes sur les données d'entrées : les colis stockés et le milieu géologique</i>	<i>199</i>
<i>1.3</i>	<i>Les caractéristiques intrinsèques des composants ouvragés du stockage</i>	<i>209</i>
<i>1.4</i>	<i>Les phénomènes régissant l'évolution interne du système de stockage</i>	<i>213</i>
<i>1.5</i>	<i>Les incertitudes technologiques</i>	<i>228</i>
<i>1.6</i>	<i>Les risques et incertitudes relatifs aux événements futurs d'origine externe</i>	<i>230</i>
<i>1.7</i>	<i>La liste des scénarios retenus</i>	<i>231</i>

1.1 Introduction

Les paragraphes ci-après présentent les résultats de l'analyse qualitative de sûreté après fermeture⁸⁰. Pour mémoire, les modalités de gestion des risques et incertitudes après fermeture conduisent à faire :

- des choix de conception du stockage au moyen de dispositions qui rendent le système peu sensible à ces incertitudes. L'analyse cherche alors à en identifier les éventuelles limites et repose sur les incertitudes résiduelles après description des dispositions de conception ;
- des hypothèses permettant d'intégrer l'incertitude dans l'évaluation de sûreté du stockage dans les scénarios : 1) dans le domaine de l'évolution normale soit dans le calcul de référence soit dans le calcul dit enveloppe, 2) dans un scénario d'évolution altérée (SEA) et 3) dans un scénario de type « What-if » selon la vraisemblance de l'événement pris en compte.

La réduction des incertitudes se poursuivra en vue de la DAC. Les principales pistes de progrès (axes de recherche et d'expérimentations par exemple) et le cas échéant des phénomènes à surveiller pendant la phase d'exploitation sont mentionnés.

L'analyse reprend la typologie des incertitudes mentionnée dans le guide de sûreté du stockage géologique (1) en distinguant :

- les incertitudes sur les données d'entrée du projet de stockage (celles portant notamment sur les colis de stockage incluant l'inventaire et les modèles de relâchement, le site d'implantation (formation hôte, formations encaissantes et environnement de surface), l'installation souterraine à terminaison et son positionnement dans la formation hôte) ;
- les incertitudes portant sur les caractéristiques intrinsèques des composants ouvragés (hors colis de stockage évoqués au chapitre II) du système de stockage ;
- les incertitudes portant sur les processus régissant l'évolution du stockage et du milieu géologique environnant (nature, extension, durée, modèle de représentation, paramètres des modèles, conséquences sur les fonctions des composants, en particulier vis-à-vis du relâchement et de la migration des radionucléides et des toxiques chimiques) ;
- les incertitudes technologiques (au sens de la réalisation et/ou la mise en place des composants ouvragés) ;

L'analyse prend également en compte les risques d'origines interne ou externe suivants :

- les risques et incertitudes relatives aux événements futurs d'origine naturelle (climatique, géodynamique interne...) ou liés aux activités humaines (intrusions humaines involontaires, effets anthropiques sur le climat et l'environnement) ;
- le risque sismique ;
- le risque de criticité.

⁸⁰ L'analyse qualitative est menée suivant la démarche décrite dans le volume I. Elle recense et évalue de manière systématique, composant par composant, au regard de leurs fonctions de sûreté, les risques et incertitudes et propose ainsi des modalités de gestion.

1.2 L'identification et la gestion des incertitudes sur les données d'entrées : les colis stockés et le milieu géologique

1.2.1 L'inventaire radiologique et sa distribution dans l'architecture à terminaison

Comme indiqué en section 2.2 du Volume II, l'inventaire radiologique est une donnée d'entrée importante pour la quantification des indicateurs des scénarios retenus dans l'évaluation de sûreté après fermeture. Dans la section précitée, est présentée la méthodologie mise en œuvre pour établir un *inventaire radiologique* tenant compte du niveau de connaissance disponible pour chacune des familles de colis.

La distribution des familles de colis dans les alvéoles, dépendante des chroniques de livraison, détermine la répartition de cet inventaire radiologique dans les alvéoles de stockage⁸¹.

A ce stade, dans le cadre de l'évaluation de sûreté après fermeture, il convient de ne pas préjuger des chroniques prévisionnelles de livraison sur une durée séculaire.

Un mode de distribution de l'activité, indépendant des chroniques de livraison, et permettant de mener des évaluations quantitatives « enveloppes » des impacts associés aux scénarios, est appliqué en distinguant les quartiers MA-VL et les quartiers HA⁸².

1.2.1.1 Modalités de définition de la distribution des familles de colis MA-VL « indépendamment des chroniques de livraison »

Méthodologie

L'approche « enveloppe » retenue consiste à considérer un mode de remplissage des alvéoles MA-VL par activités décroissantes depuis l'entrée vers le fond du quartier ; en effet :

- en scénario d'évolution normale, les fonctions de sûreté sont assurées principalement par le Callovo-Oxfordien auquel s'ajoutent les longueurs des alvéoles de stockage ; la distribution de l'inventaire radiologique a peu d'effet sur les flux de radionucléides et de toxiques chimiques susceptibles de passer par le Callovo-Oxfordien qui constitue la voie de migration principale ;
- pour certains scénarios de dysfonctionnement, la voie de transfert le long des galeries vers les liaisons surface-fond peut éventuellement devenir « plus importante » ; les quantités de radionucléides et de toxiques chimiques susceptibles de migrer par cette voie dépendent pour une part de la distance à parcourir depuis les alvéoles : les inventaires les plus proches de l'entrée du quartier MA-VL sont préférentiellement mobilisés.

La méthodologie de définition de la répartition de l'inventaire comporte deux étapes :

- les familles de colis de déchets sont classées par activité linéique décroissante (Bq/m linéaire de d'alvéole de stockage), en tenant compte néanmoins des modalités de stockage (géométrie des colis de stockage, empilements) ;
- le remplissage des alvéoles de stockage depuis l'accès du quartier vers le fond du quartier est réalisé progressivement, en respectant des règles de co-stockage physico-chimique et de co-

⁸¹ Pour un colis de stockage donné, l'alvéole de destination détermine en particulier :

- l'épaisseur des gardes verticales de Callovo-Oxfordien disponibles pour limiter et retarder la migration des radionucléides et des toxiques chimiques, en fonction de l'épaisseur de Callovo-Oxfordien disponible et du positionnement vertical de l'alvéole recevant les colis ;
- les distances à parcourir le long des galeries, entre la sortie de l'alvéole et la formation encaissante supérieure, pour les radionucléides et les toxiques chimiques susceptibles de circuler par cette voie dans certaines situations de dysfonctionnement.

⁸² Dans le quartier MA-VL, le nombre important de familles à stocker détermine un grand nombre de combinaisons de remplissage différentes y compris en tenant compte des règles qui régissent les possibilités de co-stockage physico-chimique des familles entre elles et les possibilités de co-stockage géométrique de différents types de colis. Dans les quartiers HA, le nombre de combinaisons de remplissage possibles est beaucoup plus restreint du fait d'un nombre limité de familles et en raison de la puissance thermique résiduelle des colis qui impose l'entraxe entre alvéoles HA successifs et donc la division de quartier adaptée. La redistribution se limite dans ce cas à placer les familles à plus forte activité près de l'entrée de chacun des sous-quartiers définis par des entraxes spécifiques.

stockage géométrique (contraintes d'exploitation), et en suivant les prévisions du PIGD pour les alvéoles n°1 à 4 (relatives à la phase industrielle pilote).

La Figure 1.2-1 schématise la distribution des activités qui résulte de l'application de cette méthodologie.

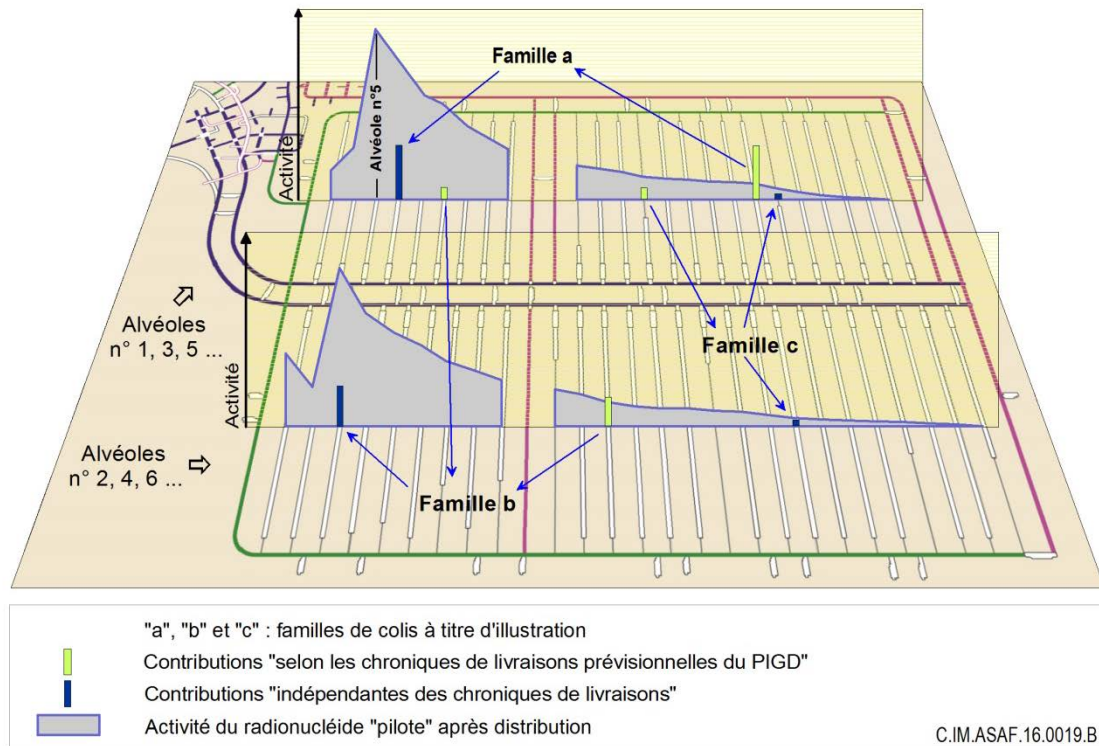


Figure 1.2-1 : Représentation schématique d'une distribution de colis MA-VL « indépendante des chroniques de livraisons prévisionnelles ».

Choix du radionucléide pilote de la distribution pour les familles MA-VL

Le résultat de la redistribution des familles de colis MA-VL dépend du radionucléide retenu comme « pilote » parmi les 144 de l'inventaire.

Une analyse exploratoire basée sur un scénario de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture a permis de déterminer qu'une distribution des familles basée sur leur activité en iode 129 donnerait l'impact potentiel global le plus élevé. Ce radionucléide est donc retenu comme « pilote » pour la distribution.

Le Tableau 1.2-1 présente le résultat de cette distribution pour les dix premiers alvéoles MA-VL.

Pour l'iode, les 10 premiers alvéoles de stockage MA-VL représentent plus de 80 % de l'inventaire en iode 129⁸³. Ce chiffre est proche de 100 % pour les vingt premiers alvéoles.

⁸³ À noter que pour le chlore 36, radionucléide mobile mais de période radioactive plus courte que l'iode 129, l'activité des 10 premières alvéoles de stockage représente près de 70 % de l'activité et les vingt premiers alvéoles, de l'ordre de 85 %.

Tableau 1.2-1 : Résultats de la méthodologie de définition de la distribution des familles MA-VL au sein du quartier suivant l'iode 129 pour les dix premières alvéoles de stockage MA-VL (alvéole ouest du quartier MA-VL)

Alvéoles MA-VL à partir de l'entrée du quartier		Iode 129 Radionucléide « pilote » en % de l'activité totale du quartier $1,9.10^{12}$ Bq
n°1	Alvéoles « figés »	0,0
n°2		5,2
n°3		0,6
n°4		2,0
n°5	Alvéoles redistribués	34,7
n°6		18,4
n°7		5,9
n°8		5,2
n°9		4,7
n°10		4,4
Total des 10 premiers alvéoles		81,0
Total des 20 premiers alvéoles		99,7

Répartition de l'inventaire au sein du quartier MA-VL

Sur la base des calculs préparatoires, la distribution des familles de colis de déchets MA-VL est réalisée (i) selon une activité en iode 129 décroissante depuis l'entrée vers le fond du quartier, et (ii) avec une activité décroissante du nord au sud de chaque alvéole de stockage, afin d'assurer une évaluation majorante vis-à-vis du transfert par la voie « ouvrages ».

Dans cette répartition, les familles des alvéoles de stockage de première phase de réalisation (alvéoles MA-VL 1 à 4) ne sont pas redistribuées.

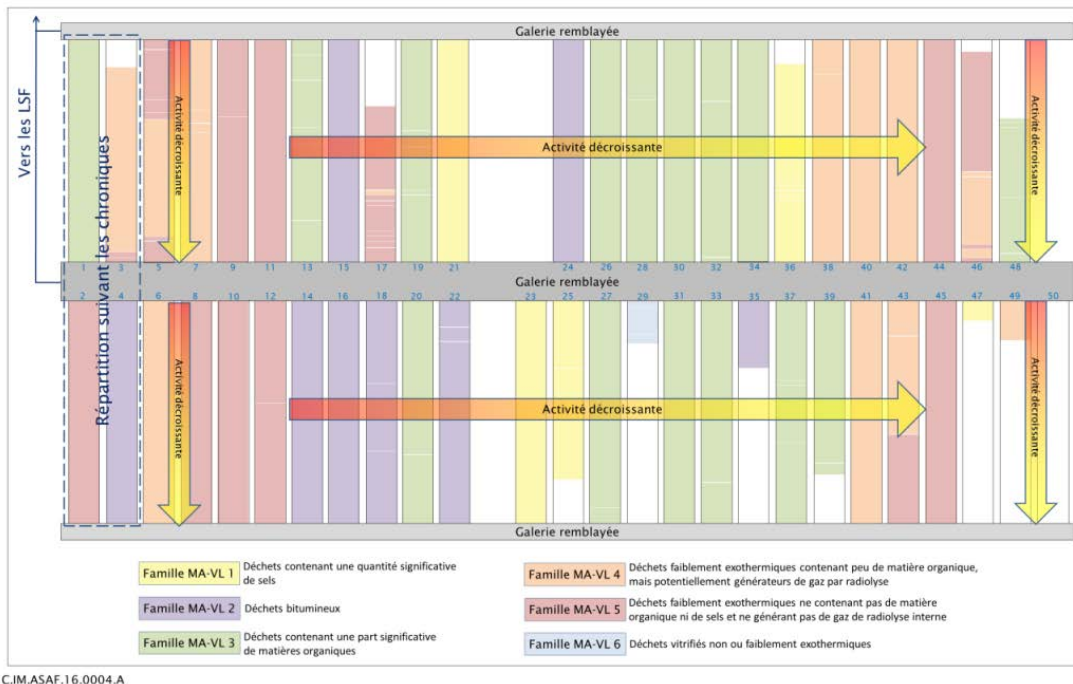


Figure 1.2-2 : Configuration de répartition de l'inventaire radiologique retenue au sein du quartier MA-VL pour les évaluations quantitatives du scénario d'évolution normale et de dysfonctionnement

Cas particulier des scénarios d'intrusion humaine

En scénario d'intrusion humaine dans lequel un « court-circuit » local des épaisseurs de Callovo-Oxfordien est envisagé, des radionucléides moins mobiles peuvent être mobilisés.

Il est donc retenu de superposer les distributions pilotées par chacun des 144 radionucléides, bien qu'elles soient physiquement impossibles simultanément, et de supposer le forage intrusif arrivant dans l'alvéole n°5⁸⁴.

Modalité de définition de la distribution des familles de colis MA-VL – Cas du mode de stockage de colis de déchets sans mise en conteneur de stockage

La mise en œuvre du stockage de certains colis de déchets sans mise en conteneur de stockage est envisagée pour certaines familles MA-VL⁸⁵. Elle conduit à un nombre de colis plus important dans certains alvéoles de stockage et à un nombre total d'alvéoles réduit.

La méthodologie de distribution des familles MA-VL « indépendamment des chroniques de livraison » convient pour apprécier l'impact de la densification d'activité générée. Néanmoins, dans une optique conservatrice, la redistribution est envisagée dès le premier alvéole⁸⁶.

Au stade actuel de l'étude de cette piste d'optimisation, le facteur de densification de l'inventaire dans les alvéoles MA-VL concernés est compris entre 2,5 et 3,5.

1.2.1.2 Modalités de définition de la distribution des familles de colis HA

Pour les quartiers HA1-HA2, six sous-quartiers caractérisés par des entraxes spécifiques entre alvéoles HA sont définis selon des hypothèses de puissance thermique et de disponibilité des colis retenues à ce stade.

De façon conservatrice, il est retenu, pour les sous-quartiers comportant plusieurs familles de colis, une redistribution des familles par activité décroissante en iode 129 de l'entrée du sous-quartier (i.e. proximité des galeries de liaison) vers le fond. Les figures ci-dessous présentent respectivement la distribution des familles de colis au sein du quartier HA1/HA2 et du quartier HA0.

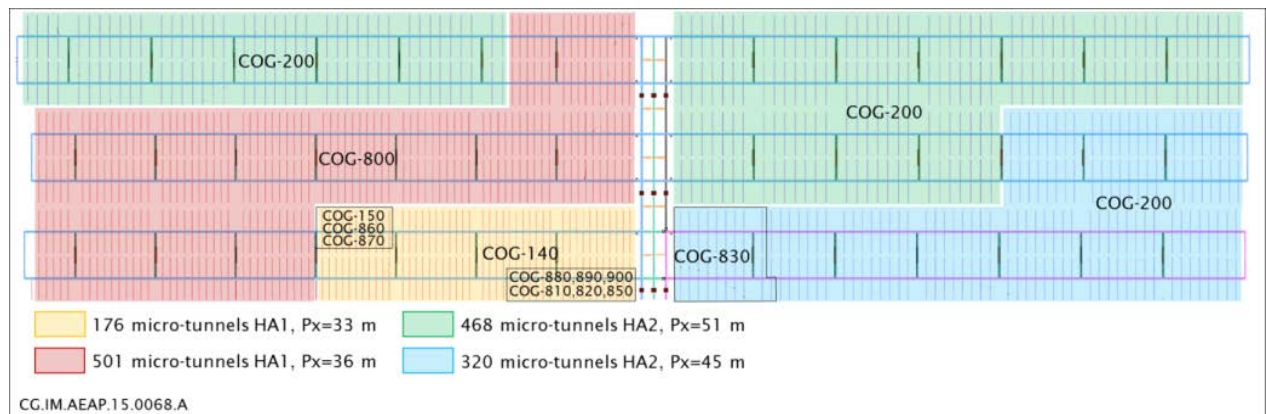


Figure 1.2-3 : Distribution des familles de colis retenue au sein du quartier HA1-HA2 et données géométriques retenues à ce stade en hypothèse pour les calculs

⁸⁴ Les quatre premiers alvéoles conservent une distribution selon la chronique envisagée en cohérence avec la phase industrielle pilote

⁸⁵ Pour rappel, ce mode de stockage ne fait pas l'objet d'une analyse détaillée ; celle-ci sera menée d'ici la DAC

⁸⁶ Cas du stockage des C1PG, CSD-C, CBFC2 sans mise en conteneur de stockage envisagé dès la mise en service une fois Cigéo autorisé à exploiter (Cf. DOS-Expl)

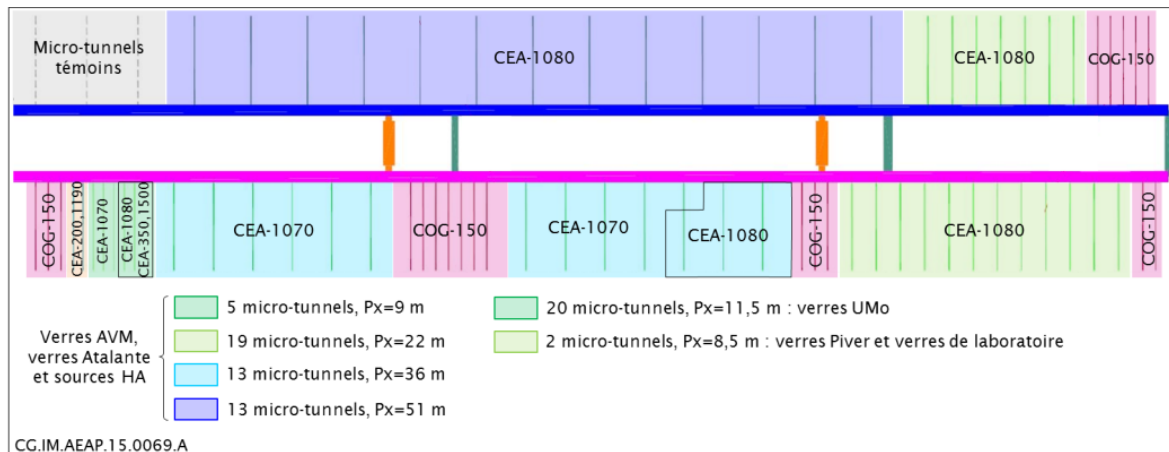


Figure 1.2-4 : Distribution des familles de colis au sein du quartier HAO et données géométriques retenues à ce stade en hypothèse pour les calculs

1.2.2 Les modèles de relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques

Les connaissances sur les processus et les modèles de représentation des relâchements des radionucléides et des toxiques chimiques sont consolidées pour l'essentiel des colis retenus dans l'inventaire de Cigéo, en particulier pour les déchets vitrifiés. Les principaux éléments sont retranscrits en annexes 7 et 8.

Le critère général de choix des modèles de relâchement « colis » à retenir dans le cadre de l'évaluation de sûreté est le suivant :

- si le niveau de connaissance est jugé satisfaisant et les incertitudes résiduelles maîtrisées, le choix de sûreté porte sur un modèle dit « phénoménologique » retenu dans la situation de référence du domaine d'évolution normale ;
- si la connaissance comprend à ce stade de fortes incertitudes (de toute nature), le choix de sûreté porte sur un modèle dit conservatif retenu dans la situation dite enveloppe du domaine d'évolution normale et le cas échéant dans les SEA si le dysfonctionnement envisagé induit des effets sur les conditions d'environnement du colis de déchet.

Les modèles de relâchement retenus à ce stade pour l'évaluation quantitative de sûreté sont détaillés dans le chapitre 2 du Volume II.

1.2.3 Le Callovo-Oxfordien

En regard des travaux de caractérisation menés depuis plus de 20 ans, le niveau de confiance sur les caractéristiques du Callovo-Oxfordien est important. Il porte notamment sur celles qui déterminent la capacité de confinement des radionucléides (et toxiques chimiques) par le Callovo-Oxfordien sur le long terme (par exemple profondeur, géométrie, épaisseur, caractéristiques d'écoulement, de transport et de rétention chimique) et contribuent à assurer des fonctions de sûreté après fermeture.

Ces acquis permettent de représenter le Callovo-Oxfordien avec des valeurs de paramètres dites « phénoménologiques » en situation de référence selon la démarche décrite dans le volume I et de proposer des valeurs conservatives pour la situation dite « enveloppe ». Ainsi, les gammes de valeurs obtenues depuis plusieurs années sur les caractéristiques d'écoulement, de diffusion et de rétention de la formation du Callovo-Oxfordien (perméabilité à l'eau, coefficients de diffusion, porosités accessibles à la diffusion, coefficients de partage (sorption et solubilités)), permettent ainsi de disposer :

- de valeurs de référence définies en considérant les conditions jugées les plus représentatives ;

- de valeurs minimale et maximale définies.

Afin de répondre à la demande formulée par l'ASN, la prise en compte d'éventuelles discontinuités verticales (flexures et failles) qui n'auraient pas été reconnues et pouvant être hydrauliquement active sera retenue dans le cadre d'un scénario conventionnel « What-if » dont la description et l'évaluation d'impact seront précisés à l'échéance de la DAC.

Comme mentionné dans le Volume II, la formation du Callovo-Oxfordien bénéficie d'une importante caractérisation aux échelles de la zone d'implantation et de recherche approfondie, et sur toute son épaisseur notamment au travers :

- de campagnes de mesures en forages et sur échantillons carottés sur la zone de transposition ;
- de la campagne de sismique 3D menée sur la ZIRA ;
- des expérimentations conduites au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

La géométrie et la structure du Callovo-Oxfordien sont aussi bien caractérisées (cf. Volume II) et les incertitudes résiduelles sur le positionnement du toit et du mur quantifiées.

L'ensemble des investigations menées (forages et sismiques) témoignent de l'absence de fractures de rejet supérieur à 2 mètres sur la zone d'implantation et de recherche approfondie. En particulier, les résultats de la sismique 3D dans la zone d'implantation et de recherche approfondie montrent l'absence d'accident décamétrique en planimétrie, de rejet supérieur à 2 mètres dans le Callovo-Oxfordien. Aucune structure susceptible de jouer un rôle hydraulique n'a été observée.

Les acquis du programme de reconnaissance confirment l'homogénéité latérale de la formation et son épaisseur importante, d'au moins 130 mètres, sur la zone d'implantation et de recherche approfondie. La conception de l'architecture fond de Cigéo, par exemple, le domaine de longueur des alvéoles MA-VL prend en compte ces données de manière à préserver l'épaisseur de garde minimum tout en tenant compte du pendage de la formation et de la variation de son épaisseur sur la zone d'implantation et de recherche approfondie.

Les connaissances acquises permettent donc de disposer d'un ensemble de données d'entrée important et robuste à différentes échelles de la formation du Callovo-Oxfordien pour les évaluations quantitatives de sûreté après fermeture.

1.2.4 Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien

Pour rappel, les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien n'ont pas de fonction de sûreté. Elles sont néanmoins une voie de transfert des radionucléides sortant du Callovo-Oxfordien vers les exutoires et, à ce titre, elles sont représentées dans le cadre des évaluations quantitatives de sûreté.

A ce stade, l'analyse distingue les niveaux calcaires (où se trouvent des aquifères) et les niveaux marneux et, se fonde sur les meilleures connaissances disponibles⁸⁷. Les acquis de caractérisation permettent ainsi de retenir des propriétés de diffusion et de rétention dans les niveaux marneux en situation de référence du domaine d'évolution normale. Aucune propriété de rétention n'est en revanche affectée aux niveaux calcaires.

Afin de couvrir les incertitudes résiduelles relatives aux propriétés hydro-dispersives des niveaux marneux et à leur variabilité latérale, ceux-ci sont représentés en considérant, en situation enveloppe, l'absence de rétention comme pour les niveaux calcaires.

Les formations encaissantes supérieures peuvent être soumises à l'érosion liée à l'évolution géodynamique interne du site et aux évolutions climatiques. Depuis 2005, des travaux de terrain ont permis de consolider et de préciser les processus d'érosion, en particulier entre les plateaux et les

⁸⁷ Les campagnes de forages ont permis d'apporter des éléments de connaissance sur les caractéristiques des formations encaissantes (voir le chap. 1 du Volume II) suivantes:

- perméabilité, de porosité, de transport (coefficient de diffusion) et de rétention chimique par sorption pour les niveaux marneux ;
- directions et des vitesses des écoulements, en lien avec l'identification des exutoires naturels potentiels à l'actuel et sur le long terme.

vallées. Par ailleurs, la géodynamique interne du site a été précisée. Le couplage avec les évolutions climatiques enveloppes possibles montrent l'absence de processus d'érosion significatif sur le million d'année, ou qui ne débuteraient qu'à partir de 750.000 ans.

L'influence de ces évolutions (même limitées) sur les écoulements sur un million d'années a été évaluée au moyen de simulations intégrant les cycles d'évolutions climatiques potentielles (y compris en lien avec les effets anthropiques) et les érosions en surface (incluant l'évolution géodynamique interne).

Le modèle hydrogéologique du secteur à l'actuel et sur le prochain million d'années couplé aux modèles d'évolution géodynamique retenus comme enveloppe a permis de préciser l'évolution des champs de charge dans le Dogger et dans l'Oxfordien et celle du champ de gradient de charge hydraulique vertical dans le Callovo-Oxfordien (déterminé par les charges hydrauliques du Dogger et de l'Oxfordien Carbonaté) à l'actuel et sur le prochain million d'années, en particulier à l'échelle de la zone d'implantation et de recherche approfondie. Les résultats montrent que l'hydrogéologie du secteur (Dogger et Oxfordien Carbonaté) ne présente pas d'évolution significative sur le prochain million d'années par rapport à l'actuel, que ce soit en termes de directions ou de vitesses d'écoulement.

Dans ce cadre, les simulations de transport des particules introduites dans les horizons perméables du Dogger et de l'Oxfordien Carbonaté au niveau de la zone d'implantation de recherche approfondie qui permettent d'évaluer les trajectoires potentielles des radionucléides à l'actuel et dans le futur, ne montre pas d'évolution significative. Les principales caractéristiques sont :

- un exutoire naturel du Dogger, localisé à environ 35 km au sud de la ZIRA et correspondant à des lignes de courant longues d'environ 60 km, d'abord orientées vers l'Ouest, puis vers le sud après traversée de la zone de fracturation du secteur de Poisson ;
- un champ d'écoulement orienté vers le nord pour l'Oxfordien calcaire, et qui se traduit notamment par l'absence d'exutoire naturel autour de la zone d'implantation et de recherche approfondie.

La consolidation et la précision des évaluations des évolutions climatiques, géodynamiques et hydrogéologiques du milieu géologique à l'échelle de la ZT, et plus particulièrement de la ZIRA, depuis 2005 soulignent la stabilité (relative) du milieu géologique sur le million d'années, plus particulièrement. Cela conduit à considérer sur le million d'année un environnement stable du Callovo-Oxfordien et de facto une stabilité de ses caractéristiques (hors les effets du stockage transitoires ou localisés en champ proche).

L'absence de modification significative des écoulements dans l'Oxfordien et le Dogger sur le prochain million d'années par rapport à l'actuel conduit à considérer le modèle hydrogéologique consolidé sur toute la période d'évaluation, sans distinction de l'actuel et du long terme.

En situation de référence du domaine d'évolution normale, les différences de charges hydrauliques entre les différentes formations géologiques sont calées sur les résultats des modélisations hydrogéologiques.

En situation « enveloppe », Il est fait le choix conventionnel de retenir les flux hydrauliques ascendants ou descendants dans le Callovo-Oxfordien résultant d'une différence de charge hydraulique maximale uniforme et constante dans le temps afin de maximiser les effets sur le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques vers le toit et le mur du Callovo-Oxfordien.

1.2.5 L'environnement de surface : la biosphère

Conformément à la démarche présentée au volume I, le choix des biosphères types retenues pour les évaluations repose sur des choix « conventionnels ». Les principales incertitudes sont couvertes dans le choix des différentes composantes de la biosphère :

- choix des biosphères types à considérer ;
- choix des exutoires ;
- choix des groupes de référence hypothétiques, des classes d'âge, et de leurs habitudes alimentaires en lien avec leurs activités⁸⁸ ;
- choix des modèles de transfert.

Les choix liés à chacune de ces composantes sont présentés ci-après.

1.2.5.1 Choix des biosphères types

Conformément au guide relatif au stockage en formation géologique (ASN 2008) et à la démarche présentée dans le Volume I, pour couvrir les incertitudes liées aux évolutions de la biosphère sur le long terme, différentes biosphères types sont à considérer pour réaliser les évaluations des impacts radiologiques et chimiques. Leur choix repose sur des simulations qui considèrent les deux évolutions climatiques et géomorphologiques (cf. Volume II) suivantes :

- l'évolution naturelle (climat non altéré par l'activité humaine) ;
- l'évolution considérant les effets anthropiques (climat altéré par les gaz à effet de serre).

Cinq biosphères types sont identifiées comme plausibles sur le long terme⁸⁹. Elles sont considérées comme équiprobables.

Pour évaluer les impacts de dose dans le cadre des évaluations quantitatives d'impact après fermeture, trois biosphères types sont retenues :

- une biosphère type tempérée ;
- une biosphère type boréale ;
- une biosphère type climat chaud subtropical humide.

Au stade du DOS, les biosphères types « tempérée » et « chaude subtropicale humide » considérées comme enveloppes sont traitées.

La mise en place d'un pergélisol limite l'accessibilité à l'eau en profondeur. Les activités humaines sont donc uniquement associées à l'exploitation de l'eau de surface. En l'absence d'exutoire naturel par les rivières, il n'est pas retenu de biosphère type toundra.

La biosphère type boréale sera traitée à l'échéance de la DAC.

1.2.5.2 Choix des exutoires

Exutoire du Dogger

Les connaissances et les simulations associées permettent de retenir l'exutoire naturel du Dogger qui se situe à environ 35 km au Sud de la zone d'implantation et de recherche approfondie.

Depuis cette zone d'implantation et de recherche approfondie, les écoulements dans le Bathonien et la Dalle Nacrée sont en direction Ouest-Nord-Ouest, avec une vitesse de pore moyenne (de l'ordre de 5 km par 100 000 ans) se dirigent ensuite vers le Sud après avoir traversé la zone de fracturation diffuse. Les lignes de courant atteignent leur exutoire naturel après environ 600 000 ans de temps de transfert dans le Dogger. Peu d'évolution des caractéristiques du Dogger est attendue au cours du prochain million d'années (cf. chapitre 1, Volume II) quel que soit le scénario climatique.

⁸⁸ Cette composante inclut le choix des produits animaux et végétaux consommés par le groupe hypothétique.

⁸⁹ Les biosphères types considérées comme plausibles à long terme sont (i) une biosphère type tempérée, (ii) une biosphère type boréale, (iii) une biosphère type toundra, (iv) une biosphère type climat chaud subtropical à pluie d'hiver qui n'existerait qu'au cours des prochains 50 000 ans et, (v) une biosphère type climat chaud subtropical humide qui serait susceptible d'exister jusqu'à 600.000 ans.

Selon la démarche biosphère qui privilégie le choix d'exutoires parmi les exutoires identifiés à l'actuel ou envisagés dans le futur d'après les modélisations hydrogéologiques ou, le cas échéant, le choix d'exutoire « conventionnel », il ressort des acquis de connaissances que :

- l'exutoire naturel du Dogger est très éloigné (35 km) de Cigéo ;
- sur la trajectoire vers cet exutoire naturel, il existe une zone de fracturation diffuse qui peut constituer une zone d'exutoires artificiels par pompage ;
- au droit de la zone d'implantation et de recherche approfondie, le Dogger est peu productif et ses eaux présentent une chimie (salinité) qui les rend peu consommables pour l'alimentation en eau des humains et des animaux en regard d'autres sources disponibles localement, comme le Barrois.

Ces différents éléments conduisent au choix d'un exutoire conventionnel par pompage dans la zone de fracturation diffuse. De manière « enveloppe », celui-ci est localisé avant la zone de fracturation diffuse afin de capter le maximum de concentration en radionucléides potentiellement relâchés et limiter la dilution.

Les caractéristiques chimiques des eaux du Dogger, en particulier leur salinité, et la faible productivité du Dogger sur la ZIRA conduisent à exclure le cas d'un pompage dans le Dogger au droit du stockage en évolution normale.

Le choix conventionnel d'un exutoire du Dogger par pompage est retenu dans la bordure Est de la zone de fracturation diffuse, plus productive et de moindre salinité, en référence et en situation enveloppe.

▪ *Dans l'Oxfordien calcaire*

Le modèle hydrogéologique et les simulations du transport de particules montrent :

- des écoulements principalement orientés vers le Nord-Ouest, avec une vitesse de pore moyenne très faible, ce de manière stable au cours du prochain million d'années ;
- des trajectoires depuis la zone d'implantation et de recherche approfondie qui ne vont pas en direction de la zone de fracturation diffuse, au niveau des failles de la Marne (N-O) ;
- l'absence d'exutoire naturel de l'Oxfordien calcaire à proximité de la zone d'implantation et de recherche approfondie, à l'actuel et sur le long terme. Les résultats des simulations montrent qu'un exutoire naturel pourrait apparaître à l'Ornain mais tardivement, probablement au-delà du million d'années.

Les connaissances acquises indiquent que l'Oxfordien calcaire est peu productif au niveau de la ZT (et de la ZIRA) ; ses eaux, circulant lentement, et offrent une qualité (en termes de minéralisation) médiocre vis-à-vis de leur consommation par rapport aux eaux (facilement) disponibles ailleurs, notamment en surface dans les calcaires du Barrois. Les résultats des évaluations de l'érosion des formations encaissantes sus-jacentes du Callovo-Oxfordien sur le prochain million d'années indiquent :

- dans le cas de l'évolution climatique naturelle, une érosion limitée des calcaires du Barrois ; ces calcaires qui constituent une ressource en eau potentielle seraient donc encore présents dans la zone d'implantation et de recherche approfondie sur le million d'années ;
- dans le cas d'une évolution climatique perturbée (prenant en compte le réchauffement climatique), une érosion plus prononcée des calcaires du Barrois, mais ils resteraient localement présents sur la ZIRA, et constitueraient encore une ressource en eau potentielle.

Un forage pour pompage dans l'Oxfordien calcaire sur la zone d'implantation et de recherche approfondie (i.e. au droit de Cigéo) est très peu vraisemblable du fait de la possibilité d'une exploitation plus productive du Barrois.

La faible productivité des horizons poreux de l'Oxfordien, très inférieure à celle du Barrois, la qualité de leurs eaux, par rapport à d'autres ressources en eau, et leur profondeur conduisent à ne pas retenir un pompage d'alimentation en eau pour la consommation humaine et animale dans l'Oxfordien carbonaté au droit du stockage.

De manière conventionnelle, l'Andra retient dans son évaluation d'impact un exutoire par pompage dans le Barrois après un transfert vertical ascendant des quelques radionucléides et toxiques chimiques qui atteindraient les formations encaissantes supérieures.

1.2.5.3 Choix des groupes de référence hypothétiques

Afin d'évaluer l'impact sur l'Homme, conformément à la démarche biosphère décrite en annexe 1, l'Andra retient des habitudes et hypothèses correspondant à celles observées aujourd'hui pour chacune des biosphères types et groupes de références hypothétiques associés retenus.

A ce stade, le choix des groupes de référence hypothétiques est réalisé en s'appuyant sur les habitudes de vie des populations vivant à l'actuel dans la région de Meuse/Haute-Marne pour la biosphère type tempérée et biosphère analogue pour la biosphère chaude et l'exploitation possible des exutoires potentiels retenus⁹⁰.

Plusieurs groupes de référence hypothétiques sont identifiés pour chacune des biosphères types tempérée et chaude compte-tenu des potentialités des exutoires retenus (cf. Tableau 2.4-5 et Tableau 2.4-6 en annexe 1). Les habitudes alimentaires reposent sur :

- l'enquête menée dans la région de Meuse/Haute-Marne pour la biosphère type tempérée ;
- les enquêtes menées pour une biosphère analogue à la biosphère chaude tropicale humide retenue (notamment en Espagne).

Pour les évaluations de l'impact, le groupe de référence hypothétique multi-activités exposé à toutes les voies de transfert est retenu.

Les évaluations sont réalisées en considérant :

- pour l'exutoire Barrois, un groupe de référence hypothétique multi-activités avec irrigation de cultures céréalières ;
- pour l'exutoire Dogger, un groupe de référence hypothétique multi-activités sans irrigation de cultures céréalières.

Pour tenir compte des incertitudes relatives au niveau d'autarcie, il est fait l'hypothèse que le groupe de référence hypothétique multi-activités consomme en autarcie complète les produits issus de ses activités.

⁹⁰ Le choix des groupes de référence hypothétiques s'appuie : (i) sur la description de l'ensemble des caractéristiques des composantes de la biosphère type retenue (climat, végétation, faune, sols, géomorphologie, géologie, hydrologie, et hydrogéologie, et activités humaines) et (ii) sur l'exploitation possible du milieu pour chaque biosphère type retenue, incluant les caractéristiques de l'exutoire retenu et les activités humaines possibles par utilisation de cet exutoire.

Les voies d'expositions sont respectivement la voie d'exposition par ingestion du fait de la consommation des divers produits animaux et végétaux en autarcie et les voies d'exposition par inhalation et exposition externe du fait de ses activités extérieures.

L'ensemble des groupes de référence hypothétiques identifiés sera étudié pour la demande d'autorisation de création.

1.2.5.4 Choix des modèles de transfert dans la biosphère

La modélisation des transferts de radionucléides ou toxiques chimiques vers l'homme est réalisée via la chaîne alimentaire depuis les exutoires retenus.

Conformément à la démarche, la quantification des transferts repose sur les modèles suivants :

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

1.3 Les caractéristiques intrinsèques des composants ouvrages du stockage

1.3.1 Les caractéristiques des ouvrages à base d'argile

Les ouvrages concernés sont les scellements constitués d'un noyau à base d'argile (cf. volume II). La composition minéralogique du matériau argileux n'est pas spécifiée à ce stade⁹¹.

L'Andra possède un important corpus de connaissances acquises sur les matériaux ouvragés argileux, en particulier ceux à base d'argile gonflante, tant sur leur comportement que sur leur mise en œuvre, grâce à de nombreux essais et maquettes menés jusqu'à des échelles pluri-métriques. Cet acquis montre que l'objectif d'une perméabilité du noyau argileux à saturation de 10^{-11} m/s peut être atteint avec différents types d'argile et correspond à un large domaine de densité sèche de mise en place et donc à diverses méthodes de mise en forme et de mise en place.

Dans le scénario d'évolution normale, la perméabilité à l'eau à saturation du noyau argileux correspondant à la performance hydraulique visée des scellements est retenue.

La présence d'argile dans le noyau du scellement représente une caractéristique favorable à la rétention de radionucléides et toxiques chimiques et peut ainsi contribuer à la fonction de sûreté « Retarder et atténuer les flux de radionucléides relâchés dans les ouvrages », bien que ce ne soit pas une exigence. Néanmoins, des propriétés de diffusion et de rétention dans la situation de référence du scénario d'évolution normale sont retenues. On ne retient aucune propriété de rétention en situation enveloppe.

La valeur de perméabilité fixée dans les exigences est retenue pour les situations du domaine d'évolution normale (de référence et enveloppe).

Le cas d'une situation où le noyau n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue est jugée très peu vraisemblable. Elle conduit à considérer ce dysfonctionnement uniquement dans le cadre d'un scénario « What-if ».

⁹¹ Plusieurs types d'argile gonflante ont été étudiés sur les plans de leurs caractéristiques physico-chimiques et de leur mise en œuvre (technologie), et particulièrement celle de type bentonite MX80 (Montmorillonite sodique). Les performances associées à leur utilisation pour constituer le noyau argileux ont été évaluées.

1.3.2 Les caractéristiques intrinsèques des ouvrages à base de bétons

Le béton est mis en place pour constituer le revêtement et soutènements des ouvrages de stockage (hormis les alvéoles de stockage de déchets HA), les massifs d'appui des scellements (selon les solutions de noyau de scellement retenues), et le remplissage d'ouvrages, le cas échéant, (comme par exemple la recette des puits).

Le béton⁹² du revêtement des alvéoles MA-VL offre des conditions cimentaires favorables à une faible solubilité de l'essentiel des radionucléides. Cela contribue à limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage.

Au cours du temps, le béton constituant le revêtement-soutènement va se dégrader. Il peut subir (i) des sollicitations mécaniques conduisant à terme à des phénomènes de fracturation, et (ii) des sollicitations chimiques, notamment avec l'eau du Callovo-Oxfordien.

1.3.2.1 Les caractéristiques hydrauliques et de transport des ouvrages en béton

Du fait de l'évolution mécanique des bétons sur le long terme conduisant à leur fissuration et leur fracturation pour l'essentiel des ouvrages, il est fait le choix dans la situation de référence et la situation enveloppe du SEN de retenir :

- une perméabilité à l'eau pénalisante, prise équivalente à celle d'un sable (Le béton est représenté comme un milieu poreux continu équivalent) ;
- l'absence de propriétés de transport diffusif dans les composants en béton.

1.3.2.2 Les caractéristiques de rétention dans les ouvrages en béton classique

Le comportement à long terme du béton, notamment sa dégradation chimique au cours du temps, est bien appréhendé. Les travaux de recherche menés permettent ainsi de proposer un modèle d'altération du béton⁹³, dit SAD (Sain Dégradé Altéré) : les revêtements/soutènements des galeries et des alvéoles MA-VL se dégraderont suivant des processus de carbonatation sous eau et d'hydrolyse, au contact des eaux du Callovo-Oxfordien. Plus spécifiquement, du fait de l'oxydation des argilites en champ proche des ouvrages pendant l'exploitation, de manière transitoire, ces eaux seront initialement enrichies en sodium, potassium, carbonates, chlorures et sulfates. Des dispositions de conception sont ainsi prises contre les attaques sulfatiques des bétons par une formulation adaptée.

En regard des faibles circulations d'eau mises en jeu dans le stockage du fait de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et des échanges de solutés entre les bétons et les eaux du Callovo-Oxfordien gouvernés par la diffusion, les connaissances acquises sur les processus de dégradation des bétons permettent de conclure que :

- l'état chimique « neutralisé » n'est pas atteint sur le million d'années, et l'état de dégradation du béton de revêtement est au plus de type « altéré » ;
- la carbonatation se développe globalement depuis l'extrados du revêtement/soutènement et son extension est limitée dans les fissures/fractures.

L'incertitude résiduelle porte essentiellement sur les extensions spatio-temporelles des différents états de dégradation⁹⁴.

Les valeurs de coefficients de partage solide-solution (Kd) ont été acquises pour la majorité des radionucléides et toxiques chimiques sur des ciments CEM I et CEM V frais à altérés (par hydrolyse), et comparées aux mesures sur pôles purs des ciments (e.g. CSH, AFt, portlandite, calcite). Les valeurs ne

⁹² Des formulations de béton classiques sont étudiées et caractérisées (formulations CEM I et CEM V notamment). Les propriétés physiques et chimiques de ces deux types de ciments sont différentes et permettent de balayer le champ du possible en matière de propriétés visées.

⁹³ Le modèle d'altération considère l'environnement du Callovo-Oxfordien.

⁹⁴ Pour mémoire, des propriétés de rétention sont retenues uniquement dans les revêtements-soutènements des alvéoles MA-VL du fait de l'environnement cimentaire qu'ils offrent. Conventionnellement, aucune propriété de rétention chimique (sorption, solubilité) n'est considérée pour les bétons des autres ouvrages que les alvéoles MA-VL.

sont pas applicables aux ciments bas pH, les incertitudes résiduelles étant relatives aux écarts de compositions du matériau et des protocoles de mesure utilisés.

Les valeurs des limites de solubilité⁹⁵ sont établies pour un état sain et un état altéré du béton, par des calculs thermodynamiques à l'équilibre, en considérant différentes compositions d'eau et de phases solides cimentaires.

Tableau 1.3-1 : Modalités de gestion des incertitudes relatives aux caractéristiques intrinsèques des revêtements des alvéoles MA-VL

Revêtement-des alvéoles MA-VL (incluant le remplissage donnant la forme de la partie utile)		
Fonction : Limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage		
Caractéristiques intrinsèques : coefficients de partage et limite de solubilité		
Incertitudes	Maîtrise des incertitudes	
	Options de conception	Hypothèses de scénarios
Extension spatio-temporelle de la dégradation par hydrolyse des bétons	Résistance aux attaques sulfatiques par une formulation adaptée.	Toute l'épaisseur de béton est représentée par une zone unique sur toute la durée de l'évaluation avec la performance la moins favorable entre l'état sain et l'état dégradé, ce qui conduit à retenir pour chaque radionucléide, les valeurs des paramètres de rétention parmi les valeurs conservatives obtenues par mesures, calcul ou par analogie.
Paramètres de rétention chimique (sorption et solubilité)	Béton classique (ciment à base de portlandite)	Rétention chimique retenue que pour les ouvrages en béton des alvéoles MA-VL (du fait de l'environnement cimentaire qu'ils offrent). Pour chaque radionucléide, sont retenues les valeurs des paramètres de rétention et de solubilité les moins favorables parmi celles conservatives obtenues par mesure ou par analogie des bétons, entre l'état « sain » et l'état « altéré ». Aucunes rétention et limite de solubilité ne sont retenues pour les autres ouvrages.

L'incertitude résiduelle sur l'extension spatio-temporelle de la dégradation chimique du béton de revêtement/soutènement des alvéoles MA-VL est prise en compte en considérant les valeurs de rétention et de solubilités les moins favorables entre le béton « sain » et le béton « altéré » et appliquées de manière homogène dans tout le béton et constante dans le temps depuis la fermeture du stockage :

- En situation de référence, les valeurs retenues sont celles phénoménologiques ;
- En situation enveloppe, les valeurs retenues sont les valeurs conservatives.

En l'absence de mesure ou d'analogie avec des éléments chimiques, aucune valeur de rétention ou de limite de solubilité n'est retenue pour les radionucléides et les toxiques chimiques concernés.

1.3.2.3 Les caractéristiques mécaniques des massifs d'appui des scellements

L'évolution des caractéristiques mécaniques des interfaces à long terme du fait des différentes dégradations chimique et mécanique (couplage chémo-mécanique) n'est pas encore bien quantifiée à ce stade. La conception et le dimensionnement des massifs d'appui (longueur, type d'ancrage) en regard des caractéristiques minéralogiques (i.e. physico-chimiques) du noyau argileux prennent en compte cette incertitude.

⁹⁵ Dans certains cas, la valeur retenue est issue d'analyses par analogie d'éléments chimiques lorsque les mesures ne sont pas disponibles.

Une défaillance des différents scellements du fait d'un glissement important des massifs d'appui sous la poussée éventuelle du noyau argileux est ainsi considérée comme étant très peu vraisemblable. Elle est couverte par le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements qui considère l'absence de gonflement du noyau argileux ou de manière générale des caractéristiques mécaniques spécifiées, du fait notamment d'une mise en place de matériaux autre que ceux prévus ou d'une évolution phénoménologique non anticipée (cf *infra*).

1.3.3 Les caractéristiques des matériaux de remblaiement des ouvrages

Le remblaiement des galeries mis en place à la fermeture du stockage contribue à maintenir la stabilité mécanique de l'installation souterraine après sa fermeture, et plus particulièrement à limiter l'extension de la zone d'argilites endommagée dans le temps.

Une fois remblayées, de par leur longueur et leur section, les galeries offrent un milieu poreux qui, même avec une perméabilité élevée, contribue à limiter les vitesses de convection longitudinale en leur sein. Elles favorisent ainsi un transfert par diffusion des radionucléides et toxiques chimiques vers le Callovo-Oxfordien, le long du transfert dans les galeries et une perte par décroissance de certains radionucléides le cas échéant⁹⁶.

Le retour d'expérience sur les matériaux poreux, notamment argileux, remaniés conduit à ne pas identifier d'éléments réhabilités à l'atteinte des caractéristiques physico-chimiques du remblai mis en place répondant à l'exigence de limitation de l'extension de la zone d'argilites endommagée autour du stockage.

Il est considéré que lors de la mise en place du remblai, les contrôles de bon remplissage des galeries par ces remblais permet de ne pas retenir la possibilité d'un vide apical dans le scénario d'évolution normale.

A ce stade, il est fait l'hypothèse que le remblai sera tout ou parti constitué d'argilites excavées et reconditionnées (par exemple par broyage et criblage).

Compte tenu du retour d'expérience acquis, le remblai est représenté comme un milieu poreux équivalent avec des propriétés homogènes dont des propriétés hydrauliques jugées raisonnablement atteignables. Aucune performance de rétention (sorption et solubilité) n'est prise en compte.

⁹⁶ Aucune rétention chimique n'est demandée au matériau constitutif du remblai.

1.4 Les phénomènes régissant l'évolution interne du système de stockage

Après fermeture, les argilites du Callovo-Oxfordien et les composants ouvragés peuvent subir ou subiront des évolutions physico-chimiques principalement sous l'effet des interactions thermiques, hydraulique-gaz, mécaniques et/ou chimiques entre le stockage et le Callovo-Oxfordien ou entre les composants ouvragés. Les sections suivantes abordent ces différents phénomènes en considérant l'état initial à la fermeture du système de stockage et son évolution sur le long terme.

1.4.1 La perturbation mécanique des argilites autour des ouvrages de stockage

Du point de vue mécanique, les opérations de construction et d'exploitation du stockage induisent un endommagement mécanique des argilites. Ce chapitre aborde la réponse mécanique du Callovo-Oxfordien à l'excavation (endommagement initial) conduisant à un endommagement mécanique des argilites, puis le comportement différé de cet endommagement au contact des différents ouvrages du stockage.

Pour rappel, la conception de l'installation souterraine vise à préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien en retenant notamment certaines dispositions pour limiter son endommagement sur le long terme (par exemple en limitant les taux de vides dans les alvéoles de stockage).

1.4.1.1 Endommagement mécanique des argilites à la fermeture de l'installation souterraine (état initial)

Les nombreuses mesures et expérimentations conduites au Laboratoire souterrain fournissent un corpus de connaissance important sur les caractéristiques de la zone d'argilites en champ proche des ouvrages endommagée mécaniquement (notamment en termes d'extension, de structure et de perméabilité à l'eau) depuis le creusement, tant dans l'unité argileuse où seraient construites les installations fond de Cigéo que dans l'unité Silto-carbonatée où seraient construits les scellements des ouvrages de liaison surface-fond. La zone d'argilites endommagées mécaniquement est ainsi composée (i.e. conceptualisée) par une zone fracturée connectée (ZFC) et une zone à fracturation discrète (ZFD). La ZFC et la ZFD ne sont pas observées dans l'unité USC du Callovo-Oxfordien.

Les grands mécanismes qui pilotent le comportement mécanique des argilites, notamment lors du creusement des ouvrages sont identifiés, et les contraintes mécaniques majeures naturelles dans le Callovo-Oxfordien sont déterminées. Ces acquis permettent d'évaluer l'extension des ZFC et ZFD en fonction de la dimension (i.e. diamètre) de l'ouvrage, de son orientation par rapport à la direction de la contrainte majeure naturelle horizontale, et de l'unité du Callovo-Oxfordien dans laquelle l'ouvrage est réalisé.

Les caractéristiques hydro-dispersives sont abordées ci-après en tenant compte du comportement différé. Néanmoins il est à souligner que des tests hydrauliques ont été réalisés au Laboratoire souterrain et ont permis de calculer un domaine de perméabilités à l'eau initiales de chacune des zones ZFC et ZFD.

Les extensions de la zone fracturée connectée et de la zone à fracturation discrète reposent sur les mesures acquises au Laboratoire souterrain pour un ensemble d'ouvrages très différents (dimension, mode de creusement, mode de revêtement/soutènement, orientation par rapport aux directions des contraintes principales horizontales). Ces connaissances permettent d'établir :

- une représentation de la ZFC qui prend en compte la différence de comportement mécanique des unités USC et UA ;
- une géométrie et une proportionnalité des extensions de la ZFC et de la ZFD avec le diamètre de l'ouvrage excavé, fonction par ailleurs de l'orientation de ce dernier par rapport aux directions des contraintes principales horizontales.

De manière conservative les extensions maximales de l'endommagement du modèle conceptuel sont retenues.

1.4.1.2 Comportement mécanique différé des argilites endommagées et perméabilité à l'eau

Pour la période d'exploitation, le comportement différé des argilites est maîtrisé par la conception des revêtements-soutènements (ou chemisage pour les alvéoles HA). Après fermeture, ce comportement est maîtrisé par les ouvrages de fermeture (remblai, scellements, remplissages béton) et la spécification de limitation des taux de vides dans le stockage, en particulier dans les alvéoles de stockage.

Les observations au Laboratoire souterrain et des simulations ont permis de consolider les acquis sur le comportement différé des argilites. Dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien, le phénomène d'auto-colmatage des fractures en lien avec la présence de smectite, minéraux gonflants, dans les argilites a été observé à différentes échelles, en particulier au Laboratoire souterrain : associé à la présence du revêtement/soutènement, puis en après fermeture à celle des remblais après rupture du revêtement/soutènement, ainsi qu'à la limitation du taux de vides dans les alvéoles de stockage, qui limitent les déformations de la zone endommagée, l'auto-colmatage conduit à une cicatrisation hydraulique des fractures de la zone endommagée, notamment la zone fracturée connectée (ZFC).

En s'appuyant sur ces connaissances acquises, les processus d'auto-colmatage et de cicatrisation hydraulique sont pris en compte pour définir les caractéristiques hydro-dispersives des ZFC et ZFD en après fermeture. Les acquis de connaissance sur la perméabilité de la ZFD montrent que ses caractéristiques de perméabilité sont proches de la roche saine ; la ZFD est ainsi représentée pour la situation « enveloppe ».

La partie utile des alvéoles MA-VL comporte des vides résiduels. Aussi, la rupture du revêtement de l'alvéole MA-VL peut entraîner un processus de reprise des vides par foisonnement des argilites, donc in fine à un sur-endommagement des argilites. Sur la base des connaissances acquises sur le comportement mécanique des argilites, et des dispositions de conception visant à limiter les vides dans l'alvéole MA-VL, l'analyse du foisonnement possible des argilites conduit à :

- retenir pour l'extension maximale de la ZFD comme l'extension de la zone de foisonnement au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL ;
- représenter toute l'épaisseur de cette ZFD « étendue » avec les propriétés hydrauliques et de transport diffusif de la ZFC ;
- considérer des propriétés de rétention (sorption et solubilité) de cette ZFD « étendue » identiques à celles du Callovo-Oxfordien sain.

Pour couvrir les incertitudes résiduelles sur l'évolution à long terme des argilites endommagées mécaniquement en champ proche du stockage, les choix conservatifs suivants sont faits pour le scénario d'évolution normale (SEN) :

- la zone de fracturation connectée (ZFC) dans l'unité argileuse (UA), hormis au droit des zones de dépose des scellements, est considérée dès le début de l'après fermeture et maintenue dans la durée (référence et enveloppe) ;
- la zone de fracturation discrète (ZFD) est uniquement représentée dans la situation « enveloppe ».

Les valeurs des caractéristiques hydrauliques intègrent le processus de cicatrisation hydraulique, ce qui conduit à retenir :

- en référence du SEN, une perméabilité à l'eau correspondant à celle au droit des zones de dépose au niveau des scellements (soit 10^{-11} m/s avec cicatrisation hydraulique) dégradée de deux ordres de grandeur dans la ZFC) ;
- en situation « enveloppe » du SEN, une perméabilité à l'eau correspondant à celle au droit des zones de dépose au niveau des scellements (soit 10^{-11} m/s avec cicatrisation hydraulique) dégradée de trois ordres de grandeur dans la ZFC et une perméabilité à l'eau conservative correspondant à la valeur la plus élevée mesurée au Laboratoire souterrain pour la ZFD (juste après excavation).

Ces valeurs sont appliquées pour les argilites au contact des ouvrages de stockage (galeries remblayées, alvéoles de stockage, parties des LSF remblayées) hormis au contact des noyaux argileux de scellement.

De manière prudente, le cas d'une évolution potentielle défavorable des argilites endommagées mécaniquement au droit des scellements pouvant conduire à une dégradation de leur performance est envisagé dans le cadre d'un scénario d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture.

Les caractéristiques de transport de la ZFC et de la ZFD (hors sollicitation thermique ou chimique)

1.4.1.3 Les caractéristiques de transport de la ZFC et de la ZFD (hors sollicitation thermique ou chimique)

▪ **Propriétés de transport diffusif (D_e , ω_{acc})**

Les connaissances relatives aux propriétés de transport diffusif dans les argilites fracturées, acquises dans des échantillons comportant des fractures calibrées, indiquent une influence limitée de la fracturation sur les caractéristiques de transport par diffusion.

Les travaux réalisés permettent de définir des facteurs correctifs applicables aux paramètres de diffusion mesurés dans le Callovo-Oxfordien sain, pour la ZFC.

▪ **Propriétés de rétention chimique par sorption**

La détermination des coefficients de partage solide-solution (K_d) est indépendante de l'état de consolidation des argilites ; les mesures de rétention sont obtenues à partir d'expériences en système « batch », sur des échantillons broyés et les recherches montrent que ces mesures sont applicables aux argilites saines.

Sur la base de ces acquis et pour couvrir d'éventuels effets de la perturbation oxydante, la sorption dans la ZFC est représentée par les coefficients de partage solide/liquide correspondant à la borne basse des K_d applicables au Callovo-Oxfordien sain.

Pour la ZFD, de par notamment l'absence de connexion des fractures, les valeurs de K_d dans les argilites du Callovo-Oxfordien sain sont appliquées.

▪ **Limites de solubilité**

Des valeurs de solubilité sont disponibles pour le Callovo-Oxfordien sain. La ZFC peut être affectée par une perturbation oxydante pendant la période d'exploitation. Pour tenir compte d'éventuels effets sur la solubilité de cette perturbation, des valeurs de solubilité conservatives, correspondant à la borne haute des valeurs obtenues pour le Callovo-Oxfordien sont retenues pour la ZFC.

La ZFD n'est pas concernée par ce processus d'oxydation. Les limites de solubilités retenues sont celles obtenues dans les argilites du Callovo-Oxfordien sain.

1.4.1.4 Comportement mécanique des argilites au contact des noyaux argileux de scellements de galerie

Pour mémoire, l'évaluation de la perméabilité « en grand » du scellement prend en compte celles du noyau argileux, de la ZFC, de la ZFD et des portions de revêtement laissées en place.

De par les connaissances acquises, aucun effet du chargement du noyau argileux par le comportement différé du Callovo-Oxfordien n'est attendu. De par ses caractéristiques mécaniques, le noyau argileux contribue à limiter toute évolution de la zone endommagée et notamment à favoriser la cicatrisation hydraulique de la ZFC.

Un dysfonctionnement du noyau argileux lié à une éventuelle évolution inattendue de son chargement mécanique est considéré comme très peu vraisemblable. Ainsi, l'absence de gonflement du noyau argileux de scellement relève donc d'un scénario de type *What-if* pris de manière conventionnelle.

Les connaissances acquises permettent de prendre en compte le processus de cicatrisation hydraulique dans le domaine d'évolution normale (SEN), ce qui conduit au droit des zones de dépose du revêtement à considérer :

- en situation de référence du SEN, une perméabilité à l'eau de 10^{-11} m/s dans la zone de fracturation continue (ZFC) correspondant à une cicatrisation hydraulique « efficace »;
- en situation enveloppe du SEN, une perméabilité à l'eau de la ZFC dégradée de manière conventionnelle d'un ordre de grandeur comparée à la situation de référence, et à ne pas considérer la cicatrisation hydraulique dans la zone de fracturation diffuse (ZFD).

Le cas d'une dégradation de la cicatrisation hydraulique des argilites au droit des noyaux des scellements est traité par un scénario d'évolution altérée (SEA) qui considère le dysfonctionnement des ouvrages de fermeture par l'interface. Pour ce SEA, Il est fait l'hypothèse que le processus de cicatrisation hydraulique est dégradé, d'où une perméabilité à l'eau de la ZFC au droit des zones de dépose supérieure de deux ordres de grandeur à celle considérée en SEN pour la situation enveloppe.

Une éventuelle évolution inattendue du noyau argileux est considérée comme très peu vraisemblable et relève d'un scénario de type « *What-if* » (par exemple le choix conventionnel d'absence de gonflement du noyau argileux de scellement).

1.4.1.5 Comportement mécanique des argilites au contact des noyaux argileux des scellements des liaisons surface-fond

Dans le Laboratoire souterrain, la ZFC et la ZFD ne sont pas observées dans l'unité USC du Callovo-Oxfordien. En regard des processus mécaniques responsables de la fracturation lors du creusement, cette absence est conforme aux caractéristiques mécaniques des argilites de l'USC significativement plus résistantes que celles de l'UA.

A ce stade⁹⁷, la situation considérant la formation au cours du temps d'une zone fracturée connectée⁹⁸ continue longitudinalement au droit du noyau argileux des scellements des LSF ne peut être totalement exclue. Cette situation jugée néanmoins peu vraisemblable relève d'un scénario d'évolution altéré de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par « l'interface ».

Du fait de la connaissance acquise sur le Callovo-Oxfordien, notamment les observations menées au Laboratoire souterrain, la formation d'une ZFC continue longitudinalement dans les argilites de l'USC est jugée peu vraisemblable.

Aussi, l'Andra classe le cas du dysfonctionnement des scellements de liaison surface-fond par l'interface dans la catégorie des scénarios d'évolution altérée (cf. chapitre 3.1 du Volume III).

1.4.1.6 Comportement mécanique des argilites au droit des alvéoles HA

Au droit des alvéoles HA, les argilites sont en contact avec un matériau de remplissage mis en place à l'extrados du chemisage métallique.

⁹⁷ En lien avec les incertitudes actuelles sur le comportement différé des argilites dans l'unité silto-carbonatée (USC), et bien que la structure carbonatée de ces argilites rend peu probable un comportement différé significatif (par ailleurs qui serait limité par la présence du noyau des scellements)

⁹⁸ Au sens structure de la zone fracturée connectée (ZFC) observée dans l'unité argileuse (UA) où sont implantés les ouvrages de stockage.

Les incertitudes résiduelles sont en lien avec les effets induits par l'injection du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage. En effet, ce matériau, dont la nature précise n'est pas spécifiée à ce stade, pourrait s'infiltrer dans les fractures de la ZFC et limiter le processus de cicatrisation hydraulique de cette zone.

Pour l'ensemble des scénarios, au regard des incertitudes relatives à l'influence du matériau de remplissage en extrados du chemisage sur les caractéristiques hydrauliques de la zone fracturée continue (ZFC), l'Andra retient une perméabilité pénalisante équivalente à celle d'un sable pour représenter la ZFC autour des alvéoles HA.

L'influence chimique du matériau de remplissage sur les argilites est assimilée à ce stade à une perturbation alcaline sur toute la ZFC.

Tableau 1.4-1 : Modalités de gestion des incertitudes relatives aux processus mécaniques

Endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien		
Fonctions : Préserver les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien		
Incertitudes	Maîtrise des incertitudes relatives aux phénomènes mécaniques	
	Options de conception	Hypothèses de scénarios
Reprise des vides après rupture du revêtement/soutènement par foisonnement des argilites	Limitation du taux de vide dans les alvéoles MA-VL	Prise en compte d'une ZFC d'extension conservative permettant de garantir une épaisseur de garde saine d' <i>a minima</i> 50 mètres.
Propriétés de transport diffusif (D_e , w_{acc}) dans la ZFC, dans l'UA		Pour tenir compte des effets de la fracturation dans la ZFC, définition de facteurs correctifs ($F > 1$) appliqués aux propriétés de diffusion (D_e , w_{acc}) mesurées dans le Callovo-Oxfordien.
Comportement différé du Callovo-Oxfordien dans l'USC		Définition d'un SEA de dysfonctionnement des scellements de liaison surface fond.
Intensité du processus d'auto-colmatage des argilites fracturées, dans l'USC		Définition d'un SEA de dysfonctionnement des scellements de liaison surface fond.
Interaction hydromécanique entre le noyau argileux des scellements et les argilites	Choix des argiles gonflantes et de leur densité	Couverte dans des scénarios « <i>What-if</i> » « dysfonctionnement des scellements » qui considèrent l'absence de gonflement du noyau argileux de scellement.

1.4.2 Le transitoire thermique

Les effets de l'élévation de la température⁹⁹ sont bien appréhendés et permettent de les prendre en compte explicitement :

- vis-à-vis des mécanismes de transport et rétention dans le Callovo-Oxfordien. L'influence de la température sur les mécanismes de transport et de rétention, et les valeurs des paramètres associés, ont été mesurées expérimentalement dans les argilites du Callovo-Oxfordien :
 - ✓ les coefficients de diffusion : les valeurs des coefficients de diffusion mesurés en fonction de la température indiquent une influence qui correspond aux lois phénoménologiques de ce processus. Les effets du transitoire thermique sur la diffusion des radionucléides sont représentés selon la connaissance acquise ;
 - ✓ les coefficients de partage : les connaissances acquises permettent de définir un facteur correctif appliqué aux coefficients de partage des ions alcalins et alcalino-terreux, pour les températures supérieures à 50°C ;
 - ✓ la limite de solubilité : les mesures réalisées pour certains radionucléides sensibles à la température permettent de déterminer des facteurs correctifs applicables aux limites de solubilité pour des températures de 60 °C.
- vis-à-vis du relâchement des radionucléides et de leur comportement en solution. Après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage, les connaissances acquises permettent :
 - ✓ de prendre en compte la décroissance temporelle de l'élévation de température au cœur de la matrice verre dans les modèles de relâchement des colis de déchets HA après perte d'étanchéité des conteneurs de stockage ;
 - ✓ d'appréhender le comportement en température des radionucléides et toxiques chimiques en solution dans l'alvéole après perte d'étanchéité du conteneur de stockage (Kd et limites de solubilité de certains radionucléides). La sorption n'étant pas représentée dans l'alvéole l'influence de la température est sans objet.

Les effets du transitoire thermique (incluant les effets thermo-hydrémécaniques) sont limités par conception. Les connaissances acquises permettent pour tous les scénarios :

- d'évaluer l'intensité et l'extension spatio-temporelle du panache thermique résultant des dispositions de conception et intégrant les caractéristiques thermiques du Callovo-Oxfordien ;
- de prendre en compte les effets de la température dans le volume de Callovo-Oxfordien affecté par le transitoire thermique résiduel après disposition de conception (paramètres de transport et rétention chimique) ;
- de prendre en compte les effets de la température dans les alvéoles HA (décroissance temporelle de l'élévation de température dans les modèles de relâchement des déchets vitrifiés, application de facteurs correctifs aux limites de solubilité).

⁹⁹ Pour rappel, les caractéristiques du Callovo-Oxfordien contribuant aux fonctions de sûreté (en particulier pour la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ») sont dépendantes de la température. Les options de sûreté et de conception associées visent à se prémunir des effets irréversibles de la température sur le Callovo-Oxfordien et à limiter son influence sur la migration des radionucléides et toxiques chimiques (cf. Volume II). Ces options comprennent notamment :

- la limitation de l'exothermicité des colis de stockage ;
- l'espacement des colis, le cas échéant, par des intercalaires ;
- l'espacement des alvéoles de stockage exothermiques ;
- la mise en place de conteneurs de stockage étanches pour les déchets vitrifiés ;
- la séparation du quartier MA-VL du quartier HA.

Les simulations prenant en compte ces dispositions indiquent un transitoire thermique de courte durée par rapport aux périodes de dissolution des verres et des temps de migration des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien.

Tableau 1.4-2 : Modalités de gestion des incertitudes relatives au transitoire thermique

Composants concernés	Incertitudes	Maîtrise des incertitudes relatives au transitoire thermique	
		Options de conception/exigences spécifiées	Hypothèses de scénarios
Alvéole de stockage HA	Effets induits de l'élévation transitoire de température sur le relâchement des radionucléides, et leur comportement (transfert et rétention) en ambiance thermique (50°C pour HA0, 70°C pour HA1/HA2)	Option d'un conteneur de stockage étanche sur une durée permettant l'atteinte de la température à cœur du verre au moment de l'arrivée d'eau : <ul style="list-style-type: none"> de 50°C pour les déchets vitrifiés HA0 de 70°C pour HA1/HA2. 	Domaine d'évolution normale et SEA/ <i>What-if</i> « dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA » : <ul style="list-style-type: none"> Application d'un facteur correctif aux paramètres de transport et rétention chimique pour les radionucléides sensibles à la température. Intégration de la décroissance temporelle de la température dans le modèle de relâchement après perte d'étanchéité du conteneur de stockage.

1.4.3 Le transitoire hydraulique-gaz

Après sa fermeture, le stockage entre dans une phase de transitoire hydraulique, dû à sa resaturation progressive par les eaux du Callovo-Oxfordien et à la production transitoire d'hydrogène principalement par corrosion anoxique des composants métalliques et la radiolyse des déchets organiques MA-VL.

Cette phase est caractérisée par un état transitoire « non saturé » de tout ou partie des composants du stockage dont la durée, variable selon les ouvrages, dépend principalement de la production d'hydrogène et de la migration de l'hydrogène dissout dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

Des simulations ont été conduites sur ce transitoire, en se fondant sur les connaissances acquises sur la production d'hydrogène ainsi que les caractéristiques de transfert des gaz dans les différents composants du système de stockage et leurs éventuelles interfaces. La description générale de ce transitoire est bien appréhendée. La connaissance acquise indique que la production et la migration d'hydrogène ne sont pas susceptibles de modifier les performances des composants ouvrages et du Callovo-Oxfordien, notamment une fracturation de ce dernier par la pression de gaz.

A ce stade, les incertitudes résiduelles portent essentiellement sur la quantification de la durée d'atteinte de la saturation totale des différents composants du système, et en conséquence son influence sur le transport par la voie ouvrage des radionucléides et toxiques chimiques potentiellement relâchés durant cette période.

En se plaçant directement dans un état initial « saturé » à la fermeture du stockage, pour l'ensemble des composants du stockage, y compris les ouvrages de fermeture, on s'affranchit de ces incertitudes résiduelles.

Cette approche est conventionnelle et conservatrice vis-à-vis du transfert des radionucléides et toxiques chimiques par la voie eau : en effet, elle ne tire pas parti d'un relâchement potentiellement différé des radionucléides et toxiques chimiques pendant la période de non saturation et d'une limitation des flux d'eau et du transfert par convection et diffusion des radionucléides et toxiques dans les composants du stockage non saturés et en conséquence de la décroissance de certains radionucléides pendant cette période.

A ce stade, la définition des scénarios (SEN, SEA et « *What-if* ») considèrent uniquement un transport par l'eau reposant sur un état initial saturé du stockage et à l'équilibre hydraulique (dès la fermeture définitive du stockage).

L'état initial saturé est jugé « enveloppe » vis-à-vis du transfert de solutés.

La représentation du transitoire hydraulique-gaz dans les scénarios est envisagée pour la DAC. Le transport des radionucléides gazeux, plus particulièrement le carbone 14, sera traité dans ce cadre.

Tableau 1.4-3 : Modalités de gestion des incertitudes associées au transitoire Hydraulique-Gaz

Composants concernés	Incertaines	Maîtrise des incertitudes	
		Options de conception	Hypothèses de scénarios
Callovo-Oxfordien Alvéole de stockage HA Alvéole de stockage MA-VL Galeries remblayées Scellements	Quantification de la durée d'atteinte de la saturation totale des composants	Sans objet	Etat initial saturé dès la fermeture du stockage considéré comme enveloppe et pris dans le cadre du DOS Description d'un SEN prenant en compte le transitoire hydraulique-gaz pour la DAC.
Callovo-Oxfordien endommagé Galeries et liaisons surface-fond remblayées	Influence du transitoire hydraulique-gaz sur le transport des radionucléides et toxiques chimiques sous forme de gaz	Sans objet	Etat initial saturé dès la fermeture du stockage considéré comme enveloppe et pris dans le cadre du DOS Description d'un SEN prenant en compte le transitoire hydraulique-gaz pour la DAC et prise en compte du transfert de carbone 14 sous forme de gaz.

1.4.4 Les perturbations chimiques

Sans préjuger de leur effet sur le comportement des radionucléides et toxiques chimiques, plusieurs processus chimiques de natures différentes peuvent se produire dans le stockage, d'une part par son exploitation sur une durée d'ordre séculaire, d'autre part par la présence de déchets ou des matériaux constituant les composants ouvragés. Il s'agit principalement de :

- la perturbation « oxydante » qui est engendrée par les phénomènes de désaturation et de pénétration d'oxygène dans les argilites endommagées mécaniquement autour des ouvrages, lors de la phase d'exploitation ;
- la perturbation « alcaline » des argilites et des composants ouvragés argileux, qui se produit au contact de fluides alcalins issus de matériaux cimentaires (argilites au contact des revêtement-soutènement des galeries et des alvéoles MA-VL ; noyau argileux de scellement au contact de massifs d'appui en béton) ;
- la perturbation « organique » liée à la libération d'espèces organiques par certains déchets MA-VL ;
- la perturbation « saline » liée à la présence de sels contenus dans certains déchets MA-VL ;
- la perturbation « fer/argile » au contact de composants métalliques.

Les processus impliqués lors de ces sollicitations chimiques sont bien connus ; leurs extensions sont bien appréhendées, de faibles ampleurs, limitées pour la plupart à la zone d'argilites endommagées initiale.

Ces sollicitations chimiques, en termes d'extension et d'effets potentiels sur les caractéristiques sollicitées des composants pour réaliser les fonctions de sûreté (c'est-à-dire perméabilité, transport et rétention chimique des radionucléides, ...) sont évoqués au cas par cas ci-après.

1.4.4.1 La perturbation oxydante

Dans les argilites

La ventilation pendant la phase d'exploitation du stockage provoque la pénétration d'oxygène dans une partie de la ZFC.

Les connaissances acquises, reposant notamment sur les données acquises au Laboratoire souterrain, conduisent aux conclusions suivantes :

- l'extension de la perturbation oxydante est limitée et n'affecte que la surface des fractures de la zone de ZFC la plus proche de la paroi ;
- la perturbation se traduit par une oxydation de la pyrite des argilites à la surface des fractures ;
- l'eau des argilites qui resature les ouvrages aura de manière transitoire une composition chimique différente de celle des argilites non perturbées, en particulier un pH acide et des concentrations plus élevées en sulfates, Na, CO₂ etc.

Les processus mis en jeu sont bien connus. Les incertitudes résiduelles à ce stade portent essentiellement sur l'extension de la perturbation, en lien avec l'extension de la désaturation des argilites de la ZFC depuis la paroi des ouvrages (extension radiale et extension depuis la surface des fractures).

La perturbation oxydante n'est pas explicitement représentée. Elle est couverte par les choix conservatifs des caractéristiques de rétention chimique dans la ZFC.

Dans les matériaux cimentaires

Des dispositions de conception (notamment par une formulation adaptée) sont prises pour protéger les bétons de l'attaque sulfatique, plus particulièrement celle issue des eaux des argilites porales transitoirement agressives en raison de la perturbation oxydante (modification du pH, augmentation de la teneur en sulfates...).

La carbonatation atmosphérique peut se produire dans les composants en béton, pendant la période d'exploitation. Son extension est estimée limitée au plus décimétrique à la fermeture définitive du stockage et la quantité de béton carbonaté faible. Dans une démarche prudente à ce stade, cette carbonatation atmosphérique est couverte par les choix conservatifs des paramètres de rétention dans les revêtements-soutènements des alvéoles MA-VL.

Dans l'alvéole HA

Concernant l'alvéole HA, par conception, les eaux issues du Callovo-Oxfordien endommagé oxydées pendant l'exploitation, sont tamponnées par le matériau de remplissage de nature cimentaire à l'extrados du chemisage. Cela permet de s'affranchir de cet effet dans le domaine d'évolution normale. Un éventuel effet renvoie aux analyses des processus de corrosion du conteneur de stockage qui couvrent les conditions d'environnement (cf. *infra*).

Compte tenu de son extension limitée à une partie de la zone de fracturation continue (ZFC), la perturbation oxydante n'est pas explicitement représentée. Elle est couverte par des choix conservatifs des caractéristiques de rétention chimique dans la ZFC.

Vis-à-vis des processus de corrosion des composants métalliques, elle est maîtrisée par conception avec un matériau de remplissage spécifié à l'extrados du chemisage.

1.4.4.2 La perturbation alcaline des argilites au contact de bétons

La connaissance acquise par les études expérimentales et les simulations menées depuis de nombreuses années permet de conclure les points suivants :

- les principaux processus pilotant les interactions bétons/argilites sont acquis. Ils ont permis de consolider le modèle conceptuel en définissant deux zones affectées de manière distincte par la perturbation :
 - ✓ une première dite « reminéralisée » correspondant à une modification importante des caractéristiques texturales, minéralogiques et géochimiques des argilites ;
 - ✓ une deuxième dite « zone affectée par un panache alcalin sans reminéralisation » correspondant à une zone d'argilites peu ou non reminéralisées mais avec un pH élevé.
- les simulations d'interactions béton/argilites ont permis d'appréhender l'extension spatio-temporelle de ces deux zones. L'extension de la zone reminéralisée est d'environ quelques décimètres sur le million d'années selon l'ouvrage concerné, donc limitée en regard de l'épaisseur de garde d'argilites (a minima 50 mètres).

La reminéralisation conduit notamment à la dissolution des phases argileuses accompagnée de la précipitation de phases secondaires, telles saponites, les zéolites ou d'autres phases hydratées. Les modifications minéralogiques attendues induisent des modifications de la structure porale et en conséquence une influence sur les coefficients de diffusion et les porosités accessibles.

Les incertitudes résiduelles à ce stade limitent :

- la prédictibilité du comportement des radionucléides dans cette zone. Des connaissances complémentaires sont envisagées pour consolider les résultats acquis à ce stade ;
- la prédictibilité de l'efficacité du processus d'auto-colmatage dans cette zone (processus notamment lié au gonflement des minéraux smectiques).

Dans une approche conservatrice, il est fait l'hypothèse que la zone d'argilites reminéralisée présente les caractéristiques hydrauliques et propriétés de transport similaires à celles d'un sable (i.e. perméabilité, De et porosité accessible pénalisants). Les processus d'auto-colmatage ne sont pas pris en compte.

Des données relatives aux caractéristiques de rétention chimique sont disponibles pour certaines phases secondaires avérées. Elles sont prises en compte uniquement en situation de référence.

Dans la zone non reminéralisée :

- des facteurs correctifs sont définis permettant de corriger les coefficients de diffusion des anions en fonction de la force ionique ;
- des facteurs correctifs sont définis permettant de corriger en référence et situation enveloppe, les K_d des ions alcalins et alcalino-terreux en fonction de la concentration en potassium et de la force ionique ;
- les valeurs de limites de solubilité sont prises pénalisantes pour les radionucléides si la force ionique est très élevée (supérieure à 4 fois la force ionique des eaux du Callovo-Oxfordien non perturbé).

1.4.4.3 La perturbation alcaline au contact de bétons bas pH (cas des scellements)

Dans le noyau argileux de scellement

Dans le noyau argileux de scellement au contact de massifs d'appui en béton bas pH, les évaluations menées par simulation numérique indiquent que la perturbation alcaline correspondrait au plus à la dissolution de 5 % de la smectite initiale de l'argile gonflante à une distance métrique depuis l'interface avec les massifs d'appui, ce qui est négligeable au regard de la longueur du noyau argileux.

Ces résultats montrent que la formulation en béton bas pH mis en œuvre au niveau des scellements permet de limiter la perturbation engendrée par leur dégradation. De même, ses effets sur les propriétés de diffusion et de rétention du noyau sont limités.

Cette disposition de conception n'est donc pas de nature à remettre en cause la capacité de gonflement du noyau. Une éventuelle dégradation de la performance du noyau argileux du fait de la perturbation alcaline est considérée comme très peu vraisemblable. Elle n'est donc pas retenue comme une cause de défaillance. Elle est néanmoins couverte par les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements qui considèrent l'absence de gonflement du noyau argileux.

Les acquis de connaissance permettent de représenter le noyau argileux sans influence de la perturbation alcaline issue des massifs d'appui et des revêtements en béton bas pH laissés en place.

Dans les argilites au droit des portions de revêtement bas pH

Les évaluations menées par simulation numérique indiquent qu'une dissolution totale de la phase smectite se produirait sur une extension maximale d'ordre centimétrique depuis l'interface, et une évolution modérée des fractions sodique et calcique de l'échangeur après 100 000 ans. De même, la force ionique et la concentration en potassium (K) évoluent très peu dans les argilites.

Ces éléments de connaissance conduisent à ne pas représenter, dans les scénarios, la perturbation alcaline des argilites au droit de béton bas pH.

Tableau 1.4-4 : Modalités de gestion des incertitudes résiduelles associées aux perturbations oxydantes et alcalines

Composants concernés	Incertaines	Maîtrise des incertitudes liées aux perturbations oxydantes et alcalines	
		Options de conception	Hypothèses de scénarios
Alvéole de stockage HA	Intensité du transitoire acide résultant de l'oxydation des pyrites	Disposition de conception pour tamponner le fluide acide provenant des argilites par mise en place d'un matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA.	Matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA efficace.
Callovo-Oxfordien endommagé	Influence de l'évolution minéralogique et de la structure porale sur les paramètres de transport des argilites reminéralisées par l'effet de la perturbation alcaline issue du béton classique	Utilisation d'un béton bas pH pour réaliser les massifs d'appui de scellement.	Représentation de la zone d'argilites remaniée avec des propriétés hydrauliques équivalentes à celles d'un sable.

1.4.4.4 La corrosion des éléments métalliques et le couplage chémo-mécanique

Le comportement à long terme des éléments métalliques (chemisages HA, conteneurs de stockage HA, autres composants tels que les ferrillages des bétons, etc.) est dominé par leur corrosion.

Les modalités de corrosion (généralisée, localisée etc.) et les cinétiques associées ont été étudiées pour différentes conditions physico-chimiques (expérimentations en laboratoires de surface et expérimentations *in situ* au Laboratoire souterrain) : l'ensemble des processus de corrosion est bien connu. Il ressort des acquis de connaissance que de manière générale, les mécanismes et vitesse de corrosion présentent peu d'incertitudes.

Par ailleurs, l'Andra a fixé un certain nombre d'exigences de conception pour les déchets nécessitant un conteneur étanche (Cf. Volume II).

Ces dispositions concernent plus particulièrement le conteneur de stockage HA afin de le protéger de certains processus de corrosion (corrosion sous contrainte, corrosion radiolytique) ou d'en limiter les effets.

Par ailleurs, différentes dispositions de conception sont mises en œuvre pour limiter l'entrée d'oxygène à l'intérieur de l'alvéole HA pendant la phase d'exploitation (la tête d'alvéole est conçue pour limiter l'entrée d'oxygène quand la galerie d'accès est ventilée). Des dispositifs de contrôle seront mis en place pour s'assurer du bon fonctionnement de ces dispositions techniques.

L'espace annulaire initial entre l'extrados du chemisage et le milieu géologique est comblé par un matériau de remplissage qui vise à réaliser un tampon chimique vis-à-vis de la perturbation acide transitoire induite par l'oxydation des argilites en paroi, afin d'éviter un environnement acide au contact du chemisage¹⁰⁰ (et du conteneur de stockage HA) qui entraînerait des cinétiques de corrosion élevées.

Bien que peu vraisemblable, la pénétration d'oxygène à l'intérieur de l'alvéole est envisagée et conduirait à des vitesses de corrosion plus importantes à l'intérieur de la partie utile de l'alvéole HA et ainsi entraîner une perte d'étanchéité prématurée du conteneur de stockage.

Le retour d'expérience de la phase d'exploitation sur les premiers alvéoles HA0, l'optimisation des procédés de construction et les futures évolutions technologiques permettraient d'exclure cette situation pour les conteneurs de stockage HA1/HA2 stockés après 2075. La défaillance de l'ensemble des conteneurs de stockage HA relèverait d'un scénario de type « *What-if* ».

- Il est retenu:
- un scénario d'évolution altéré de défaut de conteneur de stockage HA qui considère une perte d'étanchéité dès la fermeture du stockage des conteneurs de stockage du quartier HA0 ;
 - un scénario de type « *What-if* » qui considère la perte d'étanchéité dès la fermeture du stockage de l'ensemble des conteneurs de stockage HA0, HA1, et HA2.

Tableau 1.4-5 : Modalités de gestion des incertitudes associées aux processus de corrosion des conteneurs de stockage HA

Processus de corrosion du conteneur de stockage HA		
Fonctions de sûreté concernées : Protéger les déchets de l'eau		
Incertitudes résiduelles	Maîtrise des incertitudes	
	Options de conception	Hypothèses des scénarios
Incertitude sur le développement d'une corrosion en condition oxydante (généralisée et localisée)	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositif en tête d'alvéole limitant l'entrée d'oxygène pendant l'exploitation • -Matériau de remplissage à l'extrados du chemisage 	<p>SEN : corrosion en conditions anoxiques</p> <p>SEA : perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage du quartier HA0 dès la fermeture du stockage due à une corrosion oxydante</p> <p><i>What-if</i> : perte d'étanchéité de tous les conteneurs de stockage, dès la fermeture due à une corrosion en condition oxydante</p>

1.4.4.5 La perturbation fer/argile

Le matériau de remplissage mis en place à l'extrados du chemisage des alvéoles de déchets HA limite l'interaction des produits de corrosion avec les argilites au droit des alvéoles de déchets HA. Le choix conservatif de considérer des caractéristiques hydrauliques pénalisantes et de ne pas retenir de propriétés de rétention pour la zone des argilites endommagée couvre tout effet.

¹⁰⁰ Ce matériau contribue aussi à réduire l'accessibilité de l'oxygène à l'alvéole par l'extrados du chemisage, en période d'exploitation.

La composition du matériau argileux constituant la tête des alvéoles HA n'est pas spécifiée à ce stade. La perturbation fer/argile n'est pas représentée de manière explicite dans ce composant et elle est couverte *de facto* par les choix pénalisants de retenir une performance hydraulique équivalente à celle d'un sable et de ne pas considérer de rétention chimique en lien avec l'indétermination de sa composition.

1.4.4.6 La perturbation liée à la présence de substances organiques complexantes

Lors de leur dégradation, les colis de déchets MA-VL contenant des composants organiques peuvent générer des espèces complexantes de radionucléides et toxiques chimiques et, influencer ainsi leur migration.

Des études ont été menées sur les molécules organiques de type acides monocarboxyliques (acide formique et acide acétique), acides dicarboxyliques et les acides hydroxycarboxyliques (acide isosaccharinique, ISA). Des mesures ont permis de caractériser le transport de certains radionucléides complexés. Des données expérimentales relatives aux propriétés de transport diffusif des radionucléides complexés par des molécules organiques sont disponibles.

Sur la base de ces données, l'extension de la perturbation organique, et notamment les concentrations en composés organiques, ont été évaluées par des simulations en transfert réactif utilisant les colis MA-VL de plus forte concentration en composants organiques. Les résultats montrent que l'influence de la présence de substances organiques complexantes sur la migration des radionucléides à l'échelle du Callovo-Oxfordien est très limitée (uniquement sur quelques mètres environ¹⁰¹).

Des facteurs correctifs vis-à-vis des coefficients de partage et limites de solubilité sont définis en fonction de la concentration en organique pour rendre compte de cette influence. Ils sont appliqués au droit des alvéoles MA-VL contenant des colis de déchets organiques, respectivement dans (i) dans le revêtement, (ii) la zone endommagée mécaniquement, et (iii) le Callovo-Oxfordien (sur quelques mètres).

L'effet des molécules organiques complexantes est pris en compte en distinguant les effets liés à la présence des ISA et ceux liés aux autres organiques, traités par analogie aux phtalates (cf. Tableau 2.4-10, en annexe 1).

1.4.4.7 La perturbation saline

La perturbation saline se superpose aux autres perturbations au droit des alvéoles MA-VL contenant des déchets riches en sels.

Dans les argilites, l'influence de la perturbation par des sels de nitrate sur les propriétés de rétention a été mesurée avec NaNO_3 et NaClO_4 . Les connaissances acquises ont permis de déterminer des facteurs correctifs sur les coefficients de partage de certains radionucléides (alcalins (K, Rb et Cs) et alcalino-terreux (Be, Ca et Ra). Pour les autres radionucléides, plusieurs travaux expérimentaux montrent un effet limité sur les Kd.

Des simulations menées en fonction des concentrations en Na^+ , K^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} ont permis d'évaluer les panaches de concentration correspondants et d'identifier les domaines de Callovo-Oxfordien ou de revêtement où la force ionique à partir de laquelle des effets sur les propriétés de transport diffusif et de rétention est atteinte.

Les résultats montrent que l'influence de la perturbation saline sur les propriétés de transfert des radionucléides du Callovo-Oxfordien est limitée à la ZFC.

L'effet de la présence de sels solubles dans les matériaux cimentaires a été mesurée expérimentalement pour le radium et de l'uranium (VI). L'effet est significatif et uniquement pour des forces ioniques supérieures à 0,8 M. Dans ce cas, des valeurs pénalisantes de Kd dans le revêtement pour les radionucléides sont retenues.

¹⁰¹ De faibles concentrations en complexants sont atteintes dans les argilites (par exemple les concentrations en ISA supérieures à 10^{-3} M ne dépassent pas environ 2 mètres de l'alvéole MA-VL).

Les modalités de gestion des incertitudes sont résumées dans le Tableau 1.4-6.

Les connaissances acquises permettent de définir une force ionique seuil (environ $2 \cdot 10^{-1} \text{M}$) à partir de laquelle l'effet de cette force ionique sur les propriétés de transport diffusif et de rétention est sensible.

Cet effet est pris en compte sur toute la durée de l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture, par des facteurs correctifs appliqués aux propriétés de transport et rétention aux radionucléides sensibles à cette force ionique (Cf. annexe 1).

1.4.4.8 L'activité bactérienne

Les connaissances acquises indiquent que les tailles de pores nano à microscopiques des argilites du Callovo-Oxfordien sain ou des noyaux argileux des scellements ne permettent pas un développement bactérien significatif à cause d'un manque d'espace, d'eau libre ou de nutriments.

Au sein des matériaux cimentaires, une faible probabilité d'activité microbienne est attendue en particulier au niveau des interfaces et/ou au niveau des fractures.

Dans la ZFC, l'occurrence d'une activité bactérienne est fonction de l'ouverture des fractures. Si une activité se développait leur transport serait limité du fait des conditions diffusives et de la taille des pores. La possibilité de migration ne pourrait être envisagée que dans un milieu présentant une porosité importante et sous l'effet de conditions de transport convectives.

Dans les scénarios, aucun effet d'une activité bactérienne dans la masse des composants en béton, dans les argilites saines ou dans les noyaux argileux des scellements n'est retenu.

1.4.4.9 Les phénomènes de transport par colloïdes

Les acquis de connaissance montrent que les colloïdes ne peuvent pas migrer à travers le réseau de pores des argilites car la taille des pores (et des connections entre les pores) est petite (quelques nanomètres). Les colloïdes peuvent éventuellement migrer à travers la ZFC non cicatrisée mais dans ce cas, ce transfert ne concernerait que les fractures et non les blocs d'argilites inter-fractures supposés comme sains d'un point de vue textural. Les flux correspondant seront donc limités.

La possibilité de transfert des colloïdes est donc limitée à la voie ouvrage et par la ZFC. La possibilité de transport des colloïdes par advection correspond à la possibilité de migration dans un milieu poreux présentant une porosité importante et sous l'effet de conditions de transport convectives (par exemple la ZFC qui ne serait pas cicatrisée hydrauliquement par absence d'auto-colmatage par exemple). Ces conditions sont prises en compte dans les scénarios de dysfonctionnement des scellements par une interface imparfaite et qui serait susceptible de constituer une voie de transfert convective des colloïdes.

Sur la base des éléments de connaissance disponibles, la possibilité de transfert de colloïdes n'est pas retenue dans le domaine d'évolution normal.

Les colloïdes sont représentés sans rétention chimique dans les situations de dysfonctionnement des scellements par l'interface argiles gonflantes/argilites (SEA - cf. chapitre 3.1, et « *What-if* » -cf. chapitre 5.1).

1.4.4.10 Synthèse sur les modalités de gestion des incertitudes associées aux perturbations chimiques

Le tableau ci-après résume les éléments d'analyse des incertitudes associées aux perturbations chimiques.

Tableau 1.4-6 : Modalités de gestion des incertitudes associées aux perturbations chimiques issues des déchets MA-VL

Composants concernés	Incertitudes résiduelles	Maîtrise des incertitudes	
		Options de conception	Hypothèses de scénarios
Revêtement des alvéoles MA-VL, Argilites endommagées mécaniquement, Callovo-Oxfordien.	Extension du panache des organiques complexants	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Couverte par une évaluation enveloppe considérant l'alvéole MA-VL potentiellement la plus chargée en organiques.
Revêtement des alvéoles MA-VL	Evolution des coefficients de partage (Kd) et des solubilités en présence de complexants organiques	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Effets pris en compte au droit des alvéoles MA-VL par application de facteurs correctifs en distinguant l'ISA et les autres organiques lorsque la concentration évaluée est supérieure à un effet seuil. (tous scénarios)
Callovo-Oxfordien endommagé et Callovo-Oxfordien sain	Evolution des coefficients de partage et des solubilités en présence de complexants organiques	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Effets pris en compte au droit des alvéoles MA-VL par application de facteurs correctifs en distinguant l'ISA et les autres organiques lorsque la concentration évaluée est supérieure à un effet seuil (tous scénarios).
	Evolution du coefficient de diffusion en présence de complexants organiques	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Les molécules organiques ayant un coefficient de diffusion inférieur à celui des radionucléides complexés, il est fait le choix de ne pas représenter
	Effet d'un cumul de perturbations chimiques sur les coefficients de partage et des solubilités	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Effets pris en compte au droit des alvéoles MA-VL par application de facteurs correctifs.
Revêtement des alvéoles MA-VL, argilites endommagées mécaniquement, Callovo-Oxfordien sain.	Extension de la perturbation saline	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Couverte par une évaluation enveloppe en fonction des concentrations en Na ⁺ , K ⁺ , NO ³⁻ , SO ₄ ²⁻ et la force ionique.
Revêtement des alvéoles MA-VL	Evolution des équilibres d'adsorption (Kd) et des solubilités en présence d'un panache salin	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Effets pris en compte au droit des alvéoles MA-VL par application de facteurs correctifs
	Evolution des équilibres d'adsorption (Kd) et des solubilités en présence d'un panache salin	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Effets pris en compte au droit des alvéoles MA-VL par application de facteurs correctifs dépendants de la force ionique et de la concentration en potassium
Callovo-Oxfordien endommagé et Callovo-Oxfordien sain	Evolution du coefficient de diffusion en présence d'un panache salin	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Effets pris en compte au droit des alvéoles MA-VL par application de facteurs correctifs dépendants de la force ionique
Callovo-Oxfordien endommagé	Incertain sur l'influence des micro-organismes sur la rétention, solubilité et transport des radionucléides	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Non pris en compte en scénario d'évolution normale.

1.5 Les incertitudes technologiques

On aborde dans cette section les questions de mise en œuvre des composants ouvrages dans différents ouvrages du stockage, les alvéoles, les galeries, et les scellements.

1.5.1 Les incertitudes sur les technologies mises en œuvre dans les alvéoles HA

1.5.1.1 Les conteneurs de stockage HA

Fabrication et contrôle qualité du conteneur de stockage HA et risque d'endommagement suite aux opérations de mise en stockage

Le programme d'études sur les conteneurs de stockage HA vise à définir les procédés de fabrication et de contrôle disponibles et éprouvés les plus appropriés pour lui assurer une durée d'étanchéité la plus longue possible. Un niveau de contrôle qualité maximal est envisagé : tous les conteneurs de stockage sont contrôlés.

Par ailleurs le choix d'aciers faiblement alliés est retenu pour leur tolérance vis-à-vis des processus de corrosion (corrosion sous contrainte par exemple).

Différentes dispositions de conception sont mises en œuvre pour prévenir le risque d'endommagement lors de la phase d'exploitation comme la présence de patins et la fiabilisation des moyens de manutention. Un endommagement du conteneur conduisant à sa perte d'étanchéité serait détecté pendant la phase d'exploitation par les moyens de surveillance mis en place.

De par leur niveau de contrôle et les dispositions prises pour leur mise en place dans les alvéoles, il n'est pas envisagé de conteneur de stockage HA défaillant dans le domaine d'évolution normale.

Malgré les différents contrôles et dispositions, un défaut de fabrication (ou contrôle) qui n'aurait pas été détecté serait couvert par le scénario « *What-if* » où l'ensemble des conteneurs de stockage des quartiers HA0 et HA1/HA2 est supposé perdre prématurément leur étanchéité dès la fermeture du stockage.

Matériau de remplissage à l'extrados du chemisage HA

La nature du matériau qui sera mis en place à l'extrados du chemisage est en cours de définition. Par conception, ce choix sera fait pour tamponner le transitoire acide venant des argilites oxydées en champ proche. Il s'agira de matériaux connus de type ciment/argile.

La capacité du matériau de remplissage à tamponner le transitoire acide a été vérifiée par modélisation ; elle sera également vérifiée par des expérimentations (cf. chapitre 2 du Volume II).

Un essai au Laboratoire souterrain a montré la faisabilité de mise en place par injection d'un matériau cimentaire sur une longueur de 40 mètres. L'homogénéité globale du matériau de remplissage a été contrôlée dans certaines zones à l'extrados du chemisage : aucune hétérogénéité significative du matériau n'a été relevée.

La mise en place d'un matériau de remplissage homogène, par exemple par injection, pour un alvéole HA de 100 mètres de longueur est considérée comme faisable au plan technologique : elle est retenue en référence des options de conception.

De plus, des contrôles qualité seront mis en œuvre après mise en place du matériau de remplissage afin de vérifier l'absence d'hétérogénéités importantes de ce dernier.

A ce stade, un défaut du matériau de remplissage (de type hétérogénéité importante) dans chaque alvéole HA ne peut être exclu bien que cela semble peu vraisemblable. Ce type de défaut conduirait localement à ne pas tamponner le transitoire acide induit par l'oxydation des argilites en champ proche ce qui se traduirait par une vitesse de corrosion généralisée élevée rapport à celle retenue en conception dans le domaine d'évolution normale. Elles pourraient conduire à une perte d'étanchéité prématurée du ou des conteneurs au droit de l'hétérogénéité. De manière conventionnelle, il est considéré qu'un conteneur de stockage perdrait son étanchéité au droit de l'hétérogénéité dans le cas

des HA1-2 et que deux conteneurs de stockage seraient affectés dans le cas des HA0 dans l'alvéole concerné.

Sur la base des essais déjà réalisés et des connaissances technologiques, le matériau de remplissage en extradros du chemisage HA est considéré comme efficace vis-à-vis de sa fonction de tampon du transitoire acide.

Une situation d'hétérogénéité importante du matériau de remplissage est couverte par le scénario « *What-if* » où l'ensemble des conteneurs de stockage de l'alvéole HA perdent prématurément leur étanchéité à l'eau.

1.5.2 Les incertitudes sur les technologies mises en œuvre dans les galeries

Le remblaiement des galeries

Sur le plan technologique, l'Andra dispose à ce stade d'éléments de la mise en place des remblais à base d'argilites excavées grâce au démonstrateur de Richwiller. Cet essai montre la possibilité de réaliser un remblai à base d'argilites excavées, relativement homogène et avec une densité relativement élevée.

Les conduits et chemins de câbles, nécessaires à l'exploitation du stockage, susceptibles en après fermeture de former des chemins d'écoulement préférentiels ou des vides, sont déposés à la fermeture du stockage ou remplis avec du remblai.

Le remblai n'est pas spécifié à ce stade mais les dispositions de conception (densité de mise en place, saturation initiale) devraient lui permettre de réaliser sa fonction de limitation de l'extension de la zone endommagée d'argilites après la rupture du revêtement. L'état de l'art en matière de remblai indique qu'il n'y a pas d'impossibilité à atteindre des caractéristiques mécaniques répondant à cette fonction.

Les connaissances disponibles sur les remblais argileux et les données sur les argilites excavées acquises à ce stade permettent de représenter pour les scénarios, le remblai comme un milieu poreux continu équivalent aux propriétés homogènes remplissant tout l'espace des galeries et limitant l'extension de la zone endommagée des argilites autour des galeries.

Dans une approche conservative aucune propriété de transport ou rétention chimique n'est attribuée.

La réalisation des scellements

L'Andra dispose d'un important retour d'expérience quant à la caractérisation de matériaux à base d'argile qui seraient susceptibles de constituer le noyau argileux des scellements et d'atteindre les performances visées. Les études de mise en forme et de mise en place, in situ dans des configurations proches ou identiques à celles d'un stockage ou en surface par démonstrateur (cf. chapitre du Volume II relatif à la performance des scellements) ont consolidé :

- la faisabilité de la mise en place du noyau d'argile gonflante jusqu'à un diamètre d'ouvrage de 5 à 6 mètres et avec des hors profils de dimension métrique pour ce qui concerne les galeries. Pour les puits, la verticalité est une aide à la mise en place et contribue à ce que celle-ci ne présente pas de problème particulier ;
- la faisabilité d'une gamme de solutions de mise en forme du noyau, notamment l'utilisation des pellets, pour assurer un remplissage optimal et ainsi un contact aussi parfait que possible et maîtrisé entre le noyau et les argilites du Callovo-Oxfordien ;
- la faisabilité de la mise en place de volumes de béton bas pH significatifs en configuration de galerie, avec notamment une bonne interface avec la roche (ou le revêtement) et des caractéristiques mécaniques conformes à celles attendues et mesurées sur échantillon ;
- la faisabilité du creusement de saignées.

Un contrôle qualité de la mise en place des scellements sera réalisé. Il permettra de rendre très peu vraisemblable d'éventuels non respects des spécifications sur les matériaux et leur mise en place.

Le plan de développement des composants du projet Cigéo prévoit des démonstrateurs de scellement de galerie et de scellement de descenderie dans Cigéo.

Sur la base du retour d'expérience, notamment fondé sur des expérimentations et des démonstrateurs en surface, un dysfonctionnement d'un scellement lié aux opérations de réalisation est jugé très peu vraisemblable.

Une telle situation est envisagée dans le cadre de scénarios de type « *What-if* » qui permettent de couvrir (i) une absence de gonflement du noyau argileux suite à la mise en place de matériaux autres que ceux prévus ou une évolution non anticipée, et (ii) d'éventuels défauts d'interface argile gonflante/argilites.

1.6 Les risques et incertitudes relatifs aux événements futurs d'origine externe

Conformément au guide ASN de 2008, l'évolution prévisible de l'installation de stockage et du milieu géologique intègre l'effet d'événements certains ou très probables qui concerne les évolutions climatiques, la subsidence, la surrection et les mouvements sismiques.

A ces événements d'origine naturelle s'ajoutent les activités humaines. Parmi celles-ci sont distingués les effets anthropiques (e.g. émission de gaz à effet de serre) des activités susceptibles de conduire à une intrusion. Seuls les effets anthropiques sur les cycles climatiques sont examinés dans cette section. Les intrusions humaines font l'objet d'une analyse spécifique qui est présentée dans le chapitre suivant.

Il est à noter que le choix du site et de la conception du stockage permettent d'écarter le risque de volcanisme et de diagénèse.

Le risque lié à aux effets d'un séisme est également limité par le choix de site qui se situe dans une zone de très faible sismicité. A ce stade, le spectre de niveau SMPP calculé pour le site du Laboratoire souterrain est pris comme référence. Néanmoins, l'aléa sismique pour un stockage implanté dans la zone d'implantation et de recherche approfondie sera consolidé pour la DAC.

Les chapitres suivants se focalisent ainsi sur les évolutions climatiques, l'évolution géodynamique (hors séisme) et le risque criticité.

1.6.1 Évolution climatique

L'évolution climatique a fait l'objet de simulations notamment dans le cadre de projets Européen comme BIOCLIM.

Les simulations ont été consolidées et les résultats sont disponibles pour des simulations considérant deux scénarios d'évolutions climatiques (i) l'évolution naturelle et (ii) l'évolution considérant les effets anthropiques (climat altéré par les activités humaines par la prise en compte des gaz à effet de serre).

En conditions climatiques froides, l'apparition d'un pergélisol est possible ; sa profondeur maximale serait d'ordre d'une centaine de mètres et n'atteindrait pas le Callovo-Oxfordien. L'éventualité d'un pergélisol est intégrée dans les simulations associées au modèle hydrogéologique revisité.

1.6.2 Évolution géodynamique

Des simulations de l'évolution géomorphologique intégrant le taux de surrection et les phénomènes d'érosion ont été menées. Le risque lié à l'évolution géodynamique est maîtrisé. Les connaissances acquises ont été intégrées dans :

- le modèle hydrogéologique consolidé et précisé à l'échelle du prochain million d'années ;
- les simulations considérant les évolutions climatiques.

La connaissance acquise permet une représentation au meilleur de la connaissance en scénario d'évolution normale et ne conduit pas à l'identification de scénarios altérés ou *What-if*.

1.6.3 Risque de criticité dans le stockage après fermeture

La conception de l'alvéole vise à imposer un environnement favorable à la limitation du relâchement et de la migration des radionucléides (notamment en limitant la voie de transfert par les ouvrages) ou encore vise à limiter les phénomènes de re-concentration de la matière fissile par la limitation des vides. Les dispositifs mis en œuvre dès la conception cherchent à maîtriser le risque criticité après fermeture, notamment par des alvéoles de stockage qui offrent un environnement favorable à :

- une limitation du relâchement des radionucléides ;
- une migration préférentielle vers la voie de transfert par diffusion du Callovo-Oxfordien.

Par ailleurs des dispositions sont prises pour limiter les vides au sein des alvéoles et pour réduire les phénomènes de re-concentration des radionucléides fissiles. L'analyse associée au risque criticité après fermeture de Cigéo sera apportée à la DAC¹⁰².

1.7 La liste des scénarios retenus

Sur la base des connaissances acquises à ce stade, l'analyse qualitative de sûreté a permis d'identifier :

- les risques et incertitudes dont les effets restent dans le domaine d'évolution normale. L'analyse a conduit à définir des modalités de gestion de ces incertitudes selon l'approche retenue, à savoir :
 - ✓ pour une situation de référence dont la logique de choix a consisté à considérer de manière générale les caractéristiques et processus qui sont les plus étayés scientifiquement et technologiquement, c'est-à-dire au meilleur de la connaissance ;
 - ✓ pour une situation correspondant aux exigences applicables à Cigéo (qualifiée d'enveloppe dans le document) dont la logique de choix a consisté à ajouter un degré de conservatisme en fonction des connaissances acquises ;
- les risques et incertitudes susceptibles de dégrader une fonction de sûreté et des performances associées du composant qui contribue à cette fonction. L'analyse a conduit à identifier des causes de dysfonctionnement d'un composant susceptibles d'entraîner une dégradation significative de sa performance. Selon leur degré de vraisemblance, ces causes de dysfonctionnement ont conduit à définir des scénarios d'évolution altérée (SEA) ou des scénarios *What-if* qui permettent de couvrir les incertitudes résiduelles à ce stade et de tester la robustesse du stockage.

Nota :

Comme indiqué dans le chapitre 3 du volume II, le besoin et le mode de scellement de l'entrée des alvéoles MA-VL ainsi que leur retour d'air sont étudiés. A ce stade, les exigences relatives aux scellements horizontaux peuvent être retenues, mais l'Andra examine aussi la possibilité d'un remblai de forte densité et de perméabilité spécifiée (moindre, éventuellement constituée obtenue à partir d'un mélange d'argilite et d'argile gonflante).

Pour tester la robustesse du système de stockage, deux cas d'évaluation en matière de performances des ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL sont retenus à ce stade :

- un cas avec une performance de l'ouvrage de fermeture de l'ordre de 10^{-11} m/s en référence (exigences des scellements horizontaux) et de l'ordre de 10^{-10} m/s en situation enveloppe ;
- un cas avec une performance moindre, de l'ordre de 10^{-7} m/s.

Ces cas sont identifiés dans la suite du document en tant que « cas de calcul avec scellement » et « cas de calcul avec performance moindre, parfois qualifié de sans scellement ».

¹⁰² L'analyse du risque criticité après fermeture prend en compte les différentes évolutions du stockage au cours du temps : les évolutions mécaniques des colis et des alvéoles de stockage, les évolutions des conditions physico-chimiques (évolution des matériaux, phénomènes de re-concentration...) ainsi que les évolutions de l'inventaire des radionucléides fissiles.

L'analyse des risques et incertitudes menée sur la base des acquis de connaissances et des options de sûreté retenues conduit l'Andra à retenir :

- deux situations associées au domaine d'évolution normale : une situation de référence et une situation enveloppe ;
- trois scénarios de dysfonctionnement de type SEA des ouvrages de fermeture ;
- deux scénarios de dysfonctionnement de type SEA des conteneurs de stockage HA ;
- quatre scénarios de dysfonctionnement de type *What-if* des ouvrages de fermeture ;
- un scénario de dysfonctionnement de type *What-if* des conteneurs de stockage HA ;
- un scénario de type *What-if* relatif au Callovo-Oxfordien.

La liste de ces scénarios est précisée dans le Tableau 1.7-1, le Tableau 1.7-2 et le Tableau 1.7-3.

Tableau 1.7-1 : Liste des cas de calcul associés au domaine d'évolution normale

Domaine d'évolution normale	
Situation de référence	<p>Etat initial saturé. Situation de référence - avec scellement MA-VL</p> <p>Cette situation repose sur un ensemble d'hypothèses et de données dont la logique de sélection est de retenir celles qui s'appuient sur la meilleure connaissance scientifique et technique disponible.</p>
	<p>Etat initial saturé. Situation de référence prenant en compte une autre solution technique de fermeture des alvéoles MA-VL présentant une performance moindre qu'un scellement.</p> <p>Cette situation est définie sur les mêmes bases que la précédente, c'est-à-dire définie au meilleur de la connaissance, en considérant des scellements aux extrémités des alvéoles MA-VL représentés avec une performance minimale.</p>
	<p>Prise en compte du transitoire hydraulique-gaz. Ce transitoire sera défini pour la DAC.</p>
Situation enveloppe	<p>Etat initial saturé. Situation enveloppe - avec scellement MA-VL</p> <p>Cette situation correspond à la prise en compte des exigences applicables à Cigéo. En l'absence d'exigences spécifiées pour certaines caractéristiques des composants, la logique de sélection des données conduit à retenir les bornes les plus conservatives de la connaissance. Cette situation intègre également des choix conventionnels conduisant à ne pas prendre en compte certaines caractéristiques qui seraient favorables au retard et à l'atténuation des radionucléides.</p>
	<p>Etat initial saturé. Situation enveloppe prenant en compte une autre solution technique de fermeture des alvéoles MA-VL présentant une performance moindre qu'un scellement.</p> <p>Cette situation est définie sur les mêmes bases que la précédente, c'est-à-dire en considérant les exigences applicables à Cigéo, en considérant des scellements aux extrémités des alvéoles MA-VL représentés avec une performance minimale.</p>
	<p>Prise en compte du transitoire hydraulique-gaz. Ce transitoire sera défini pour la DAC.</p>

Tableau 1.7-2 : Liste des scénarios d'évolution altérée après fermeture (hors intrusion humaine involontaire)

Scénarios d'Évolutions Altérées (SEA)	
SEA de dysfonctionnement des scellements	<p>Dysfonctionnement des scellements des Liaisons Surface-fond (LSF) par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien (scellements des galeries opérants)</p> <p>Ce scénario correspond au dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (LSF) par l'interface. Il considère la formation d'une zone fracturée connectée (ZFC) au droit du noyau argileux dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT), unités litho-stratigraphiques en partie haute du Callovo-Oxfordien.</p>
	<p>Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien (scellements des LSF opérants)</p> <p>Ce scénario correspond au dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface. Il considère un défaut de cicatrisation hydraulique de la ZFC dans l'unité argileuse (UA) où sont implantées les installations de fond du stockage, notamment au droit des zones de dépose du revêtement.</p>
	<p>Dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et galeries) par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien</p> <p>Ce scénario correspond à un cumul de dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et galeries) par l'interface respectivement par la création d'une ZFC dans l'USC et l'UT au droit du noyau argileux et par un défaut de cicatrisation hydraulique de la ZFC, au droit des zones de dépose du revêtement. Deux cas de calcul permettant d'encadrer deux performances de scellement d'alvéoles MA-VL et d'en évaluer la sensibilité.</p>
SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	<p>Défaillance de deux conteneurs de stockage par alvéole HA de la zone HA0</p> <p>Ce scénario correspond à la perte d'étanchéité prématurée de deux conteneurs de stockage par alvéole HA. Il considère une hétérogénéité du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage conduisant localement à une vitesse de corrosion généralisée élevée, liée à la présence d'eau acide.</p>
	<p>Défaillance de tous les conteneurs de stockage du quartier HA0</p> <p>Ce scénario correspond à la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage du quartier HA0. Il considère une corrosion en condition oxydante en lien avec la présence d'oxygène dans l'alvéole HA0.</p>

Tableau 1.7-3 : Liste des scénarios What-if (hors intrusions humaines involontaires)

Scénarios « What-if »	
<i>What-if</i> Dysfonctionnement des scellements	<p>Dysfonctionnement des scellements des LSF par cumul d'une défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien</p> <p>Ce scénario correspond à la défaillance des LSF par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, et (ii) le revêtement laissé en place qui représente un défaut d'interface du fait de sa perméabilité élevée.</p>
	<p>Dysfonctionnement des scellements des galeries par cumul d'une défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien</p> <p>Ce scénario correspond à la défaillance des scellements des galeries par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, et (ii) un défaut de cicatrisation hydraulique qui conduit à une perméabilité élevée de la ZFC au droit du noyau argileux.</p>
	<p>Dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et galeries) par cumul d'une défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien</p> <p>Ce scénario correspond à une combinaison des défaillances des ouvrages de fermeture des LSF et des galeries. Il considère :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la défaillance des LSF par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, et (ii) le revêtement laissé en place qui représente un défaut d'interface du fait de sa forte perméabilité ; • et la défaillance des scellements des galeries par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, et (ii) un défaut de cicatrisation hydraulique qui conduit à une perméabilité élevée de la ZFC au droit du noyau argileux.
<i>What-if</i> dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	<p>Défaillance de tous les conteneurs de stockage HA (quartier HA0 et quartier HA1/HA2)</p> <p>Ce scénario correspond à la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage HA (quartiers HA0 et HA1/HA2). Il considère une corrosion en condition oxydante en lien avec la présence d'oxygène dans l'alvéole HA.</p>
<i>What-if</i> Callovo- Oxfordien	<p>Scénario « Discontinuité non détectée du Callovo-Oxfordien »</p> <p>Scénario « conventionnel » répondant à la recommandation de l'ASN ; il sera défini dans le cadre de la DAC.</p>

2

Le scénario d'évolution normale

2.1	<i>Description et conceptualisation du scénario d'évolution normale</i>	236
2.2	<i>Traitement du SEN</i>	266
2.3	<i>Résultats du SEN</i>	268
2.4	<i>Enseignements du SEN</i>	300

2.1 Description et conceptualisation du scénario d'évolution normale

2.1.1 Objectifs et cas de calculs retenus

Ce chapitre a pour objectif de présenter les cas de calculs du domaine d'évolution normale de Cigéo après sa fermeture.

Pour mémoire, la démarche décrite dans le volume 1 conduit à considérer deux cas de calcul :

- le premier correspond à une représentation du stockage définie au meilleur de la connaissance acquise à ce stade du projet Cigéo (cf. chap. 5 du volume I). Ce cas est défini comme la situation de référence dans la suite du document.
- le second repose sur une approche moins phénoménologique. Ce cas est parfois défini comme la situation enveloppe dans la suite du document. Il est construit en considérant :
 - ✓ les valeurs spécifiées dans les exigences lorsqu'elles sont définies ;
 - ✓ la borne la plus conservative de la connaissance disponible (y compris acquise par simulations et/ou analogie avec les données de la littérature si cela est possible) pour les composants qui ne font pas l'objet d'exigences spécifiées.

Par ailleurs, des choix conventionnels, le cas échéant, conduisent à ne pas retenir les caractéristiques qui pourraient être favorables au retard et à l'atténuation des radionucléides si ces caractéristiques ne sont pas sollicitées pour la réalisation des fonctions de sûreté.

La description de ces situations résulte de l'analyse des risques et incertitudes présentée au chapitre précédent.

Chaque cas de calcul décrit de manière simplifiée comment les radionucléides et toxiques chimiques contenus dans les déchets vont éventuellement arriver jusqu'à l'homme et son environnement et les choix structurants pour représenter les composants qu'ils traversent. Il considère ainsi tous les composants du stockage impliqués dans le transfert des radionucléides par la voie Callovo-Oxfordien ou par la voie « ouvrages » qui comprend le réseau de galeries souterraines et d'ouvrages de liaisons surface-fond. Par exemple, les encaissements et la biosphère n'assurant pas de fonction de sûreté sont décrits car nécessaires pour le calcul de l'impact radiologique.

Cette représentation intègre la conceptualisation qui en est faite pour la réalisation des calculs et les indicateurs retenus pour le traitement du SEN.

Au stade du DOS, les évaluations de sûreté n'intègrent pas la quantification de l'impact lié à la présence de toxiques chimiques.

Le scénario d'évolution normale considère uniquement le transport par l'eau reposant sur un état initial saturé, état jugé « enveloppe » vis-à-vis du transfert de solutés. Il a ainsi été fait le choix de représenter le stockage selon un état saturé dès la fermeture du stockage, c'est-à-dire ouvrages de liaison surface-fond fermés.

La représentation du stockage prend en compte l'état initial du stockage à la fermeture et son évolution sur le long terme en tenant compte des processus et événements qui paraissent suffisamment probables au sens du guide de sûreté relatif au stockage en formation géologique de ASN de 2008 (1).

Les phénomènes qui régissent l'évolution du stockage ne sont pas nécessairement tous représentés. Ils ne sont toutefois pas négligés ou ignorés par l'analyse. Ils ont pu être étudiés séparément et antérieurement à la réalisation des évaluations de sûreté. En lien avec l'analyse qualitative, les conclusions de ces études préparatoires peuvent conduire à ne pas les représenter ou à les représenter de manière très simplifiée.

2.1.2 L'architecture de stockage retenue

L'architecture retenue pour l'évaluation de sûreté est l'architecture à terminaison présentée dans le chapitre 3 du volume II. Sont prises en compte dans les évaluations 50 alvéoles MA-VL, 72 alvéoles HA0 de longueur 80 mètres (+ 3 témoins), et 1 465 alvéoles HA1/HA2 de longueur 100 mètres (+ 8 témoins).

2.1.3 La représentation du stockage dans le Callovo-Oxfordien

L'installation souterraine de stockage de Cigéo est représentée dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, à une profondeur d'environ 500 mètres. Différentes configurations sont envisagées pour chacune des situations du domaine d'évolution normale.

2.1.3.1 Situation de référence

Tous les ouvrages sont placés en milieu du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 2.1-1). Les épaisseurs de garde sont définies en tenant compte de l'épaisseur réelle de Callovo-Oxfordien dans la ZIRA et en soustrayant l'extension verticale maximale de la zone fracturée connectée (ZFC) en voûte et radier des ouvrages. Cette représentation induit des iso-épaisseurs de garde de part et d'autre des ouvrages de stockage. Elles sont supérieures au minimum exigé (50 mètres) au droit des alvéoles de stockage HA et MA-VL.

Dans cette configuration, les différences de charges hydrauliques entre encaissements sont calées sur les résultats des modélisations hydrogéologiques dont la description est détaillée au chap. 2 du Volume II. Ces valeurs sont indiquées au Tableau 2.1-2.

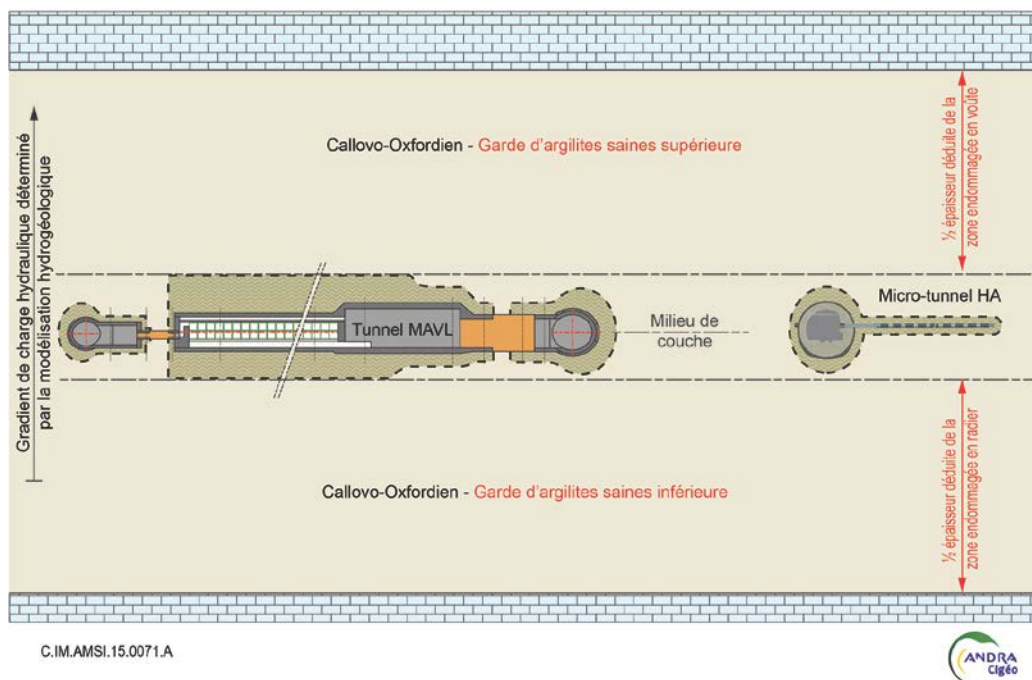


Figure 2.1-1 : Illustration schématique du positionnement des alvéoles MA-VL et alvéoles HA de stockage dans la formation hôte, en référence du SEN. Prise en compte de la géométrie réelle du Callovo-Oxfordien en termes d'épaisseur et de profondeur

2.1.3.2 Situation enveloppe

Le deuxième mode de représentation, retenu en situation « enveloppe », vise à positionner le stockage pour préserver une épaisseur de garde d'argilites saines égale au minimum spécifié dans les exigences applicables à Cigéo, soit 50 mètres (cf. chap. 1 du volume II).

Le Callovo-Oxfordien est représenté avec une épaisseur uniforme égale à l'épaisseur minimale mesurée sur l'emprise du stockage (i.e. 142 mètres). Les quartiers HA et MA-VL sont positionnés (cf. Figure 2.1-2) de sorte à ménager :

- soit une épaisseur de garde égale à 50 mètres dans la partie supérieure du Callovo-Oxfordien. Les alvéoles HA sont alors représentés dans un plan différent de celui des alvéoles MA-VL ;

L'épaisseur de garde de Callovo-Oxfordien en partie inférieure est déduite de l'épaisseur minimale du Callovo-Oxfordien, en soustrayant l'extension verticale maximale de la zone d'argilites endommagées en voûte et en radier des alvéoles de stockage.

- soit une épaisseur de garde égale à 50 mètres dans la partie inférieure du Callovo-Oxfordien.

L'épaisseur de garde de Callovo-Oxfordien en partie supérieure est déduite de l'épaisseur minimale du Callovo-Oxfordien, en soustrayant l'extension verticale maximale de la zone d'argilites endommagées en voûte et en radier des alvéoles de stockage.

Dans ces deux configurations, les flux hydrauliques ascendants ou descendants résultant d'une différence de charge hydraulique maximale sont représentés de manière uniforme et constante dans le temps, respectivement en direction de l'Oxfordien et du Dogger.

Ces valeurs sont indiquées au Tableau 2.1-2.

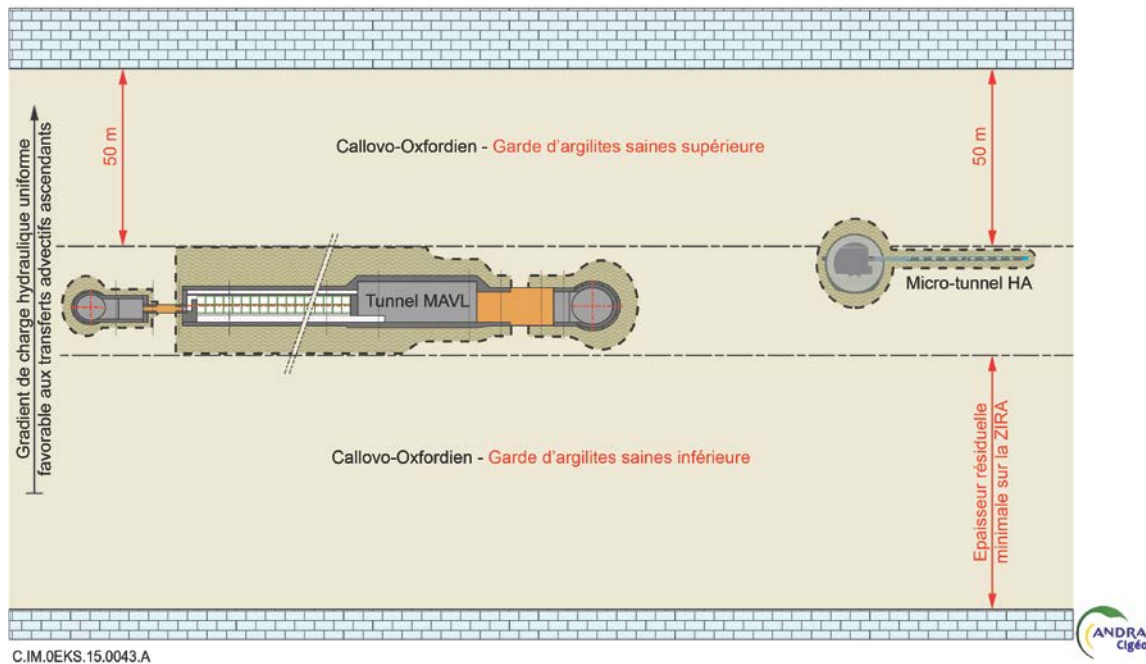


Figure 2.1-2 : Illustration schématique du positionnement des alvéoles MA-VL et alvéoles HA de stockage dans la Callovo-Oxfordien, en situation enveloppe (prise en compte de l'épaisseur de garde minimale fixée par les exigences en partie supérieure (50 mètres))

2.1.4 L'inventaire radiologique

2.1.4.1 Les radionucléides retenus

Sur la base des 144 radionucléides identifiés, compte tenu des temps de transfert au sein du Callovo-Oxfordien et dans le stockage, seuls les radionucléides ayant une période radioactive inférieure à 1 000 ans ne sont pas traités dans le cadre du scénario d'évolution normale. Cela a conduit à identifier une liste de 60 radionucléides à retenir pour les évaluations des deux situations. Elle est présentée dans le Tableau 2.1-1 ci-après.

Tableau 2.1-1 : Liste des radionucléides retenus pour l'évaluation quantitative du scénario d'évolution normale (chaînes de filiation incluses)

RN	Période (ans)	RN	Période (ans)
Be10	1.60E+06	Ra226	1.60E+03
C14	5.70E+03	Th229	7.34E+03
Al26	7.17E+05	Th230	7.54E+04
Cl36	3.01E+05	Th232	1.41E+10
K40	1.27E+09	Pa231	3.28E+04
Ca41	1.03E+05	U233	1.59E+05
Mn53	3.68E+06	U234	2.46E+05
Fe60	1.50E+06	U235	7.04E+08
Ni59	7.60E+04	U236	2.37E+07
Se79	3.77E+05	U238	4.47E+09
Kr81	2.10E+05	Np236	1.52E+05
Rb87	4.81E+10	Np237	2.14E+06
Zr93	1.53E+06	Pu239	2.41E+04
Nb92	3.50E+07	Pu240	6.56E+03
Nb93m	1.60E+01	Pu242	3.74E+05
Nb94	2.00E+04	Pu244	8.00E+07
Mo93	4.00E+03	Am243	7.36E+03
Tc97	2.60E+06	Cm245	8.50E+03
Tc98	4.20E+06	Cm246	4.73E+03
Tc99	2.14E+05	Cm247	1.80E+07
Pd107	6.50E+06	Cm248	3.40E+05
Sn126	2.30E+05	Cm250	8.00E+03
I129	1.61E+07	Bk247	1.38E+03
Cs135	2.30E+06		
La137	6.00E+04		
Sm146	1.00E+08		
Gd150	1.82E+06		
Dy154	3.00E+06		
Ho163	4.57E+03		
Ho166m	1.20E+03		
Lu176	4.00E+10		
Hf182	9.00E+06		
Re186m	1.90E+05		
Pb202	5.30E+04		
Pb205	1.53E+07		
Bi208	3.68E+05		
Bi210m	3.00E+06		

Chaînes de filiation considérées

Zr93→Nb93m,
 4N (Cm244→Pu240→U236→Th232→Th228→Ra228),
 4N+1 (Cm245→Pu241→Am241→Np237→U233→Th229),
 4N+2 (Cm246→Pu242→U238→U234→Th230→Ra226→Pb210)
 4N+3 (Am243→Pu239→U235→Pa231→Ac227).

CG.IM.AEAP.15.0066.A

2.1.4.2 Les activités radiologiques retenues

Les inventaires retenus pour l'ensemble des radionucléides étudiés sont les inventaires issus du Tableau de Construction de l'Inventaire (TCI), margés en fonction du degré de connaissances. Ils sont présentés au chapitre 2 du Volume II.

2.1.4.3 La distribution de l'activité radiologique au sein du stockage

Les modalités de distribution de l'inventaire radiologique et les distributions dans l'architecture à retenir pour les évaluations de sûreté sont présentées au chapitre 1 du présent volume.

Deux modes de distribution sont ainsi retenus pour les évaluations quantitatives du scénario d'évolution normale, selon la nature des déchets HA ou MA-VL.

2.1.5 Le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques

2.1.5.1 Les déchets MA-VL

Les modèles de relâchement retenus pour les évaluations quantitatives associées au scénario d'évolution normale sont présentés chapitre 2 du volume II.

Selon les familles de déchets MA-VL, sont retenus :

- un modèle de corrosion généralisé des éléments métalliques activés pour les déchets métalliques ;
- le modèle COLONBO, uniquement en référence, pour les déchets salins avec matrice bitume sur la durée d'intégrité du conteneur, estimée à 1000 ans ;
- un modèle de dissolution du verre type « $V_0.S$ » pour les déchets MA-VL vitrifiés (avec des valeurs maximisant les cinétiques de relâchement en situation dite enveloppe).

2.1.5.2 Les déchets HA

Le relâchement des déchets vitrifiés HA est initié suite à la perte d'étanchéité des conteneurs de stockage. Ce relâchement prend en compte la cinétique d'altération de la matrice vitreuse en conditions du stockage.

Les options de sûreté pour les modèles de relâchement par famille des colis de déchets HA ainsi que les paramètres associés sont présentés au chapitre 2 du Volume II. Selon les caractéristiques intrinsèques du verre, deux modèles de relâchement sont retenus en situation de référence :

- un régime d'altération avec la prise en compte de la vitesse résiduelle « $V_0 \rightarrow V_R$ » en milieu argileux ;
- un régime d'altération en vitesse initiale « $V_0.S$ ».

En situation « enveloppe », seul le régime d'altération en vitesse initiale « $V_0.S$ » est retenu.

2.1.6 Le Callovo-Oxfordien

Les principales caractéristiques du Callovo-Oxfordien sont fondées sur la bonne compréhension que l'on a de cette formation (cf. chap. 1 du Volume II).

Sur la base des gammes de valeur proposées, les paramètres sont pris « phénoménologiques » en référence et « conservatifs » en situation enveloppe.

La géométrie du Callovo-Oxfordien

Le toit et le mur du Callovo-Oxfordien sont respectivement assimilés aux surfaces SNC (surface de non-conformité) et LS0 (limite de séquence 0). L'épaisseur du Callovo-Oxfordien est de 153 mètres en moyenne sur la ZIRA et varie de 142 à 162 mètres du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

Pour un stockage implanté dans le plan médian du Callovo-Oxfordien (situation de référence), la variabilité de la garde (inférieure ou supérieure) est de 72 à 80 mètres pour les quartiers HA, et de 70 à 72 mètres pour le quartier MA-VL.

Homogénéité du Callovo-Oxfordien

Le Callovo-Oxfordien est représenté sous la forme d'une couche homogène latéralement et exempte de fractures.

Les gradients de charge hydrauliques

Les transferts advectifs dans le Callovo-Oxfordien et dans les formations encaissantes sont déterminés par le modèle hydrogéologique. Celui-ci aboutit à un gradient de charge hydraulique faible à l'emplacement du stockage (cf. chap. 1 du volume II).

- en situation de référence, les gradients de charge verticaux sont estimés par modélisation hydrogéologique, en considérant la géométrie réelle du Callovo-Oxfordien et le positionnement des différents ouvrages de stockage dans la ZIRA, ce qui conduit à retenir les valeurs présentées au Tableau 2.1-2 ;
- en situation enveloppe, par choix conventionnel, le gradient de charge maximal sur la ZIRA est appliqué de manière uniforme et pérenne sur la durée des évaluations (i.e. $0,1 \text{ m.m}^{-1}$ en direction de l'Oxfordien avec une garde supérieure de 50 mètres et de $0,05 \text{ m.m}^{-1}$ en direction du Dogger avec une garde inférieure de 50 mètres).

Caractéristiques intrinsèques du Callovo-Oxfordien

Les caractéristiques des argilites du Callovo-Oxfordien retenues pour les évaluations sont fournies au Tableau 2.1-2 et au Tableau 2.1-3. Pour mémoire, les valeurs des paramètres présentées dans ces tableaux correspondent à des valeurs « au meilleur de la connaissance » en situation de référence et des valeurs spécifiées dans les exigences ou conservatives (si non spécifiées) en situation enveloppe.

Tableau 2.1-2 : Paramètres applicables aux argilites du Callovo-Oxfordien saines (SNC : surface de non-conformité ; LSO : limite de séquence 0)

	Situation de référence	Situation enveloppe
Critères et dimensions	<p>Callovo-Oxfordien délimité par la SNC et la LSO.</p> <p>Epaisseur réelle variant de 142 à 162 mètres dans la ZIRA.</p> <p>Garde : de 72 à 80 mètres pour les quartiers HA et de 70 à 72 mètres pour le quartier MA-VL pour le stockage implanté au milieu du Callovo-Oxfordien.</p>	<p>Epaisseur totale minimale appliquée (145 mètres) uniformément.</p> <p>Garde inférieure ou supérieure égale à 50 mètres</p>
Perméabilité (K), en m/s	$K_h = K_v = 4 \cdot 10^{-14}$ m/s	$K_v = 2 \cdot 10^{-13}$ m/s $K_h = 3 \cdot 10^{-13}$ m/s
Gradient de charge hydraulique, en $m \cdot m^{-1}$	Issu des modélisations hydrogéologiques : compris entre 0,04 $m \cdot m^{-1}$ et 0,08 $m \cdot m^{-1}$	Valeurs min/max appliquées uniformément, soit : 0,1 $m \cdot m^{-1}$ en direction de l'Oxfordien (garde supérieure de 50 mètres) 0,05 $m \cdot m^{-1}$ en direction du Dogger (garde inférieure de 50 mètres)
Porosité cinématique (ω_{cin}), sans unités	Porosité totale / 2 = 9%	Porosité totale / 4 = 4,5%
Dispersivité, en m	$\alpha_L = \text{Epaisseur} / 10$ $\alpha_T = \text{Epaisseur} / 100$ Dispersion négligeable	

(SNC : surface de non-conformité ; LSO : limite de séquence 0)

Tableau 2.1-3 : Propriétés de rétention et de transfert des principaux radionucléides dans les argilites saines

Radio-nucléides	Forme ionique	Coefficient de diffusion effectif (De) ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)		Porosité cinématique (ω_{cin}), sans unités		Coefficient de partage (Kd) en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$		Limite de solubilité (C _{sat}) en moles.L ⁻¹	
		Situation de référence	Situation enveloppée	Situation de référence	Situation enveloppée	Situation de référence	Situation enveloppée	Situation de référence	Situation enveloppée
¹⁴ C	Organique	2,75	6,5	0,07	0,05	0	0	Infinie	Infinie
²⁶ Al	Al(OH) ₄ ⁻	2,5	6,5	0,07	0,05	0	0	2.10 ⁻⁸	6.10 ⁻⁶
³⁶ Cl	Cl ⁻	5	6,5	0,07	0,05	0	0	Infinie	Infinie
⁴⁰ K	K ⁺	110	220	0,18	0,18	5.10 ⁻³	1.10 ⁻³	9.10 ⁻⁴	1.10 ⁻³
⁴¹ Ca	Ca ²⁺	65	220	0,18	0,18	4.10 ⁻³	1.10 ⁻³	8.10 ⁻³	3.10 ⁻²
⁷⁶ Se	HSe ⁻	2,5	6,5	0,07	0,05	0	0	2.10 ⁻⁹	1.10 ⁻⁷
⁹³ Mo	MoO ₄ ²⁻	2,475	6,5	0,07	0,05	3.10 ⁻³	0	2.10 ⁻⁷	2.10 ⁻⁵
¹²⁹ I	I ⁻	3	6,5	0,07	0,05	0	0	Infinie	Infinie
²³⁵ U ²³⁸ U	Ca ₂ UO ₇ (CO ₃) ₂ ⁰	4,4	30	0,18	0,18	0,1	0,01	2.10 ⁻⁶	2.10 ⁻⁶

2.1.7 L'endommagement mécanique des argilites à la fermeture du stockage

L'endommagement mécanique des argilites est conceptualisé par une zone fracturée connectée (ZFC) et une zone à fracturation discrète (ZFD). Afin de simplifier la conceptualisation numérique, ces zones sont représentées par des cercles de surface équivalente à celle des ellipses du modèle géomécanique (Figure 2.1-3).

La ZFC et la ZFD sont représentées de manière continue le long des ouvrages, hormis au droit des zones de dépose des revêtements-soutènements dans les scellements (cf. Figure 2.1-10), sur toute la durée des évaluations.

Leur représentation prend en compte :

- la différence de comportement selon l'unité (UA, USC ou UT) du Callovo-Oxfordien (pas de ZFC dans l'USC et l'UT),
- la géométrie et la proportionnalité de leur extension par rapport au diamètre de l'ouvrage excavé, de son orientation et, au droit des alvéoles MA-VL, le taux de vide.

Les galeries sont orientées soit selon la contrainte majeure ou selon la mineure. La conceptualisation de l'ensemble des galeries considère une zone endommagée dont l'extension correspond à la plus grande surface endommagée (*i.e.* σ_{H}).

Le choix des caractéristiques de transport et de rétention des zones fracturées (ZFC) et à fracturation discrète (ZFD) est présenté au Tableau 2.4-7 (en annexe 1). Les valeurs des paramètres retenus sont présentées au Tableau 2.1-4. La zone de sur-endommagement au droit des alvéoles MA-VL est représentée avec les paramètres hydrauliques (perméabilité) de la ZFC et les propriétés de rétention et de transport de la roche saine.

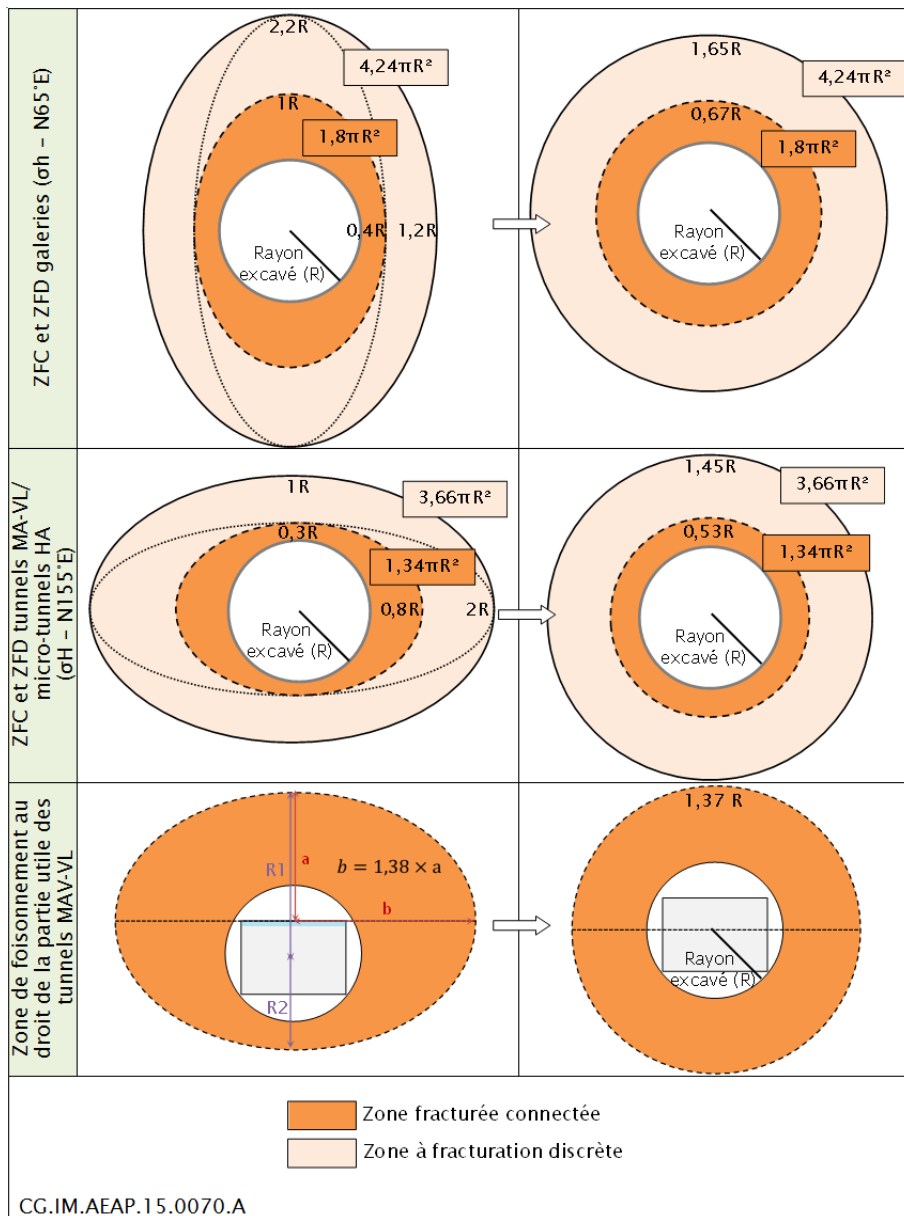


Figure 2.1-3 : Schéma conceptuel des zones de fracturation connectée et discrète et de la zone de foisonnement au droit des alvéoles MA_VL

2.1.7.1 La Zone Fracturée Connectée (ZFC)

Caractéristiques hydrauliques

Conformément à l'analyse présentée au chapitre sur la maîtrise des risques et des incertitudes (chap. 1.4.1), la valeur de perméabilité est définie en tenant compte de la cicatrization hydraulique (cf. Tableau 2.4-7, en annexe 1) :

En situation de référence, la perméabilité est :

- 10^{-11} m/s au droit des zones de dépose du revêtement-soutènement des scelllements ;
- 10^{-9} m/s au droit des portions de section courante des galeries, alvéoles MA-VL et alvéoles HA, ainsi qu'au droit des portions de revêtement-soutènement laissées en place entre les argilites et le noyau argileux des scelllements.

En situation enveloppe, la perméabilité est :

- 10^{-10} m/s au droit des zones de dépose du revêtement-soutènement des scellements ;
- 10^{-8} m/s au droit des portions de section courante des galeries, alvéoles MA-VL et alvéoles HA, ainsi qu'au droit des portions de revêtement-soutènement laissées en place entre les argilites et le noyau argileux des scellements.

Suivant l'analyse présentée au chap. 1.4.1, des facteurs correctifs sont appliqués aux paramètres de diffusion et les paramètres de rétention chimique (hors sollicitations chimiques et thermiques se superposant) sont conservatifs. Ils sont présentés au Tableau 2.1-4, en relatif par rapport aux valeurs retenues dans le Callovo-Oxfordien non endommagé mécaniquement (Tableau 2.1-3).

2.1.7.2 La Zone à Fracturation Discrète (ZFD)

Du fait de la prise en compte des processus d'auto-colmatage et de cicatrisation hydraulique, la zone à fracturation discrète n'est pas représentée en référence, mais uniquement en situation « enveloppe ». Au droit des alvéoles MA-VL, la ZFD n'est pas représentée au-delà de la zone de sur-endommagement liée à la prise en compte du taux de vide.

La ZFD est représentée avec son extension maximale définie selon le modèle conceptuel (Figure 2.1-3). Elle présente une valeur de perméabilité conservative, issue des mesures au Laboratoire souterrain après excavation : 10^{-11} m/s dans l'USC et 10^{-10} m/s dans l'UA (Tableau 2.1-4).

Tableau 2.1-4 : Paramètres applicables aux argilites du Callovo-Oxfordien endommagées

	ZFC (référence)	ZFC (situation enveloppe)	Foisonnement au droit des alvéoles MA-VL (référence)	ZFD (situation enveloppe)
Critères dimensions et	ZFC de section circulaire équivalente à la section ovoïdale : Epaisseur uniforme 0,67 R autour des galeries 0,53 R autour des alvéoles MA-VL		Section circulaire équivalente à la section ovoïdale : Epaisseur uniforme 1,37 R	ZFD de section circulaire équivalente à la section ovoïdale : voir Figure 2.1-3
Perméabilité (K), en m/s	1.10^{-09} m/s (1.10^{-11} m/s au droit des zones de dépose du revêtement des scellements)	1.10^{-08} m/s (1.10^{-10} m/s au droit des zones de dépose du revêtement des scellements)	1.10^{-09} m/s	Dans l'UT/USC : 1.10^{-11} m/s Dans l'UA : 1.10^{-10} m/s
Porosité cinématique (ω_{cin}), sans unités	Porosité totale / 2	Porosité totale / 4	Porosité totale / 2	Porosité totale / 4
Coefficient de diffusion, en $m^2.s^{-1}$	De(RN) * 2	2* (De(traceur) + 30%)	De(RN) * 2	De(traceur) + 30%
Porosité accessible (ω_{acc}), sans unités	Anions 7% Neutres et cations Porosité totale	Anions 5% Neutres et cations Porosité totale	Anions 7% Neutres et cations Porosité totale	Anions 5% Neutres et cations Porosité totale
Coefficient de partage (Kd), en $L.g^{-1}$	Valeurs de Kd et Csat conservatives utilisées dans le Callovo-Oxfordien en situation enveloppe	Valeurs de Kd et Csat conservatives utilisées dans le Callovo-Oxfordien en situation enveloppe	Valeurs de Kd et Csat conservatives utilisées dans le Callovo-Oxfordien en situation de référence	Valeurs de Kd et Csat conservatives utilisées dans le Callovo-Oxfordien en situation enveloppe
Limite de solubilité (Csat) en $mol.L^{-1}$				

(R : rayon de l'ouvrage, RN : radionucléide)

2.1.8 Le transitoire thermique

L'évolution spatio-temporelle du panache thermique a été évaluée par simulations (volume II, chapitres 5.1.2 et 5.3.2).

Dans les alvéoles de stockage de déchets HA exothermiques l'influence de la température est intégrée dans le modèle de relâchement des radionucléides (cf. chap. 2.3.3.2).

L'influence du transitoire thermique est pris en compte dans le Callovo-Oxfordien (endommagé mécaniquement et non endommagé mécaniquement) au droit des quartiers de déchets exothermiques, dans le volume de roche évalué par simulations (Figure 2.1-4).

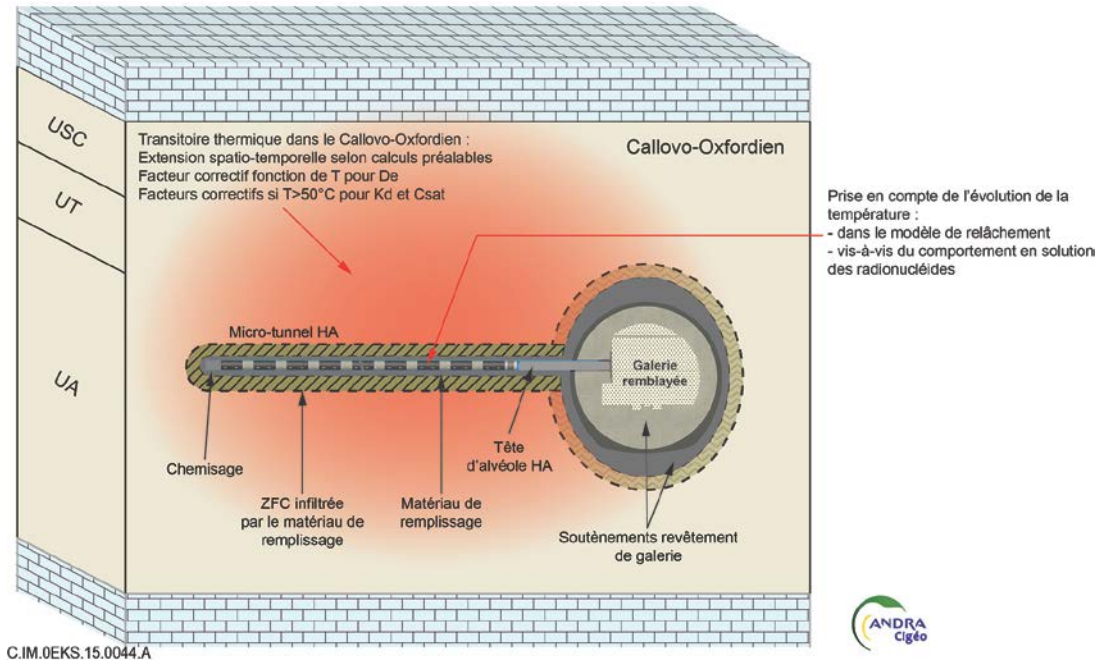


Figure 2.1-4 : Représentation schématique de la zone affectée par le transitoire thermique autour d'un alvéole HA

L'influence de la température sur les propriétés de transport et de rétention est prise en compte par application de facteurs correctifs aux coefficients de diffusion effectifs et aux paramètres de rétention de certains radionucléides. Ceux-ci sont présentés dans le Tableau 2.1-5.

Tableau 2.1-5 : Facteurs correctifs appliqués aux paramètres de transport et de rétention en fonction de la température, dans le Callovo-Oxfordien sain ou endommagé mécaniquement

	Radionucléides	Influence de la température
Perméabilité et porosité cinématique	N/A	Effet non pris en compte
De	Tous	F > 1 défini par la loi de Stokes-Einstein
ω_{eff}	Tous	Sans effet
Kd	Alcalins et alcalino-terreux	F=0,1 si T>50°C
	Autres	Sans effet
Csat	Alcalins et alcalino-terreux	F=10 si T>50°C
	Autres	Sans effet

2.1.9 Les perturbations chimiques

Les perturbations chimiques représentées sont :

- la perturbation « alcaline », qui se produit au contact de fluides alcalins issus des matériaux cimentaires lors de leur dégradation progressive ;
- la perturbation « organique » liée à la libération d'espèces organiques par certains déchets MA-VL ;
- la perturbation « saline » liée à la présence de fluides salins issus de certains déchets MA-VL.

Les modalités de représentation sont définies au cas par cas, en termes d'extension et d'effets potentiels sur les caractéristiques des composants sollicitées pour réaliser les fonctions de sûreté (e.g. perméabilité, transport et rétention chimique des radionucléides).

2.1.9.1 La perturbation alcaline issue de la dégradation de matériaux cimentaires

Le panache alcalin issu de la dégradation par hydrolyse des matériaux cimentaires est représenté par ses deux zones :

- la première, dite « reminéralisée », qui correspond à un effet important des interactions conduisant notamment à la transformation des smectites ;
- la deuxième dite « zone affectée par un panache alcalin sans reminéralisations », qui correspond au panache d'éléments issus de la dégradation des bétons, sans reminéralisation.

La perturbation alcaline est représentée dans les argilites au contact des ouvrages constitués de matériau cimentaire. Elle n'est pas représentée dans le noyau argileux des scellements ni dans le remblai des galeries.

L'extension spatio-temporelle des deux zones prend en compte la nature du matériau cimentaire (béton classique ou béton bas pH). Les volumes de roche concernés correspondent à l'extension spatio-temporelle maximale obtenue par calculs préparatoires jusqu'à épuisement de la source alcaline générant les perturbations.

L'extension la perturbation alcaline étant inférieure à celle de la ZFC, elle n'est pas représentée dans le Callovo-Oxfordien non endommagé mécaniquement.

De manière conservatrice, ces représentations sont maintenues dès la fermeture du stockage et sur toute la durée de l'évaluation, sans prendre en compte l'effet d'une altération progressive dans le temps.

Le Tableau 2.4-8 en annexe 1 résume les modalités de représentation de la perturbation alcaline selon les différentes interfaces concernées. Elles sont illustrées en Figure 2.1-5.

Interface béton classique/argilites au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL de stockage de déchets MA-VL et des galeries remblayées.

Dans la ZFC reminéralisée :

De manière très conservatrice, la zone de reminéralisation de la ZFC est représentée par des caractéristiques hydrauliques et propriétés de transport similaires à celles d'un sable (i.e. perméabilité, De et porosité accessible pénalisants).

Néanmoins, pour tenir compte de l'effet favorable de nouvelles phases minérales avérées, des coefficients de partage conservatifs par rapport aux valeurs mesurées sont pris en compte en situation de référence (cf. Tableau 2.4-8 en annexe 1).

Dans la ZFC non reminéralisée, affectée par le panache alcalin :

Dans le volume de roche affecté (défini selon les calculs préparatoires) :

- l'effet de la force ionique sur la diffusion des anions est le même que pour la perturbation saline décrite ci-après. Les mêmes facteurs correctifs sont appliqués, ils sont résumés dans le Tableau 2.1-6 ;

- l'effet compétiteur de la perturbation sur les alcalins et alcalino-terreux est pris en compte par les mêmes facteurs correctifs sur les coefficients de partage que ceux déterminés pour la perturbation saline. Ils sont résumés dans le Tableau 2.1-6. ;
 - l'effet du panache alcalin sur la solubilité est pris en compte en fonction de la force ionique par les mêmes facteurs correctifs sur les limites de solubilité que ceux déterminés pour la perturbation saline. Ils sont résumés dans le Tableau 2.1-6.
- **Interface argilites ou noyau argileux/béton bas pH**

Le béton bas pH est envisagé comme matériau constituant les massifs d'appui de scellement et les portions de revêtement situées entre le noyau argileux et les argilites.

Seul le panache sans reminéralisation est représenté (cf. Figure 2.1-10 et chapitre 1). La sorption et les propriétés de transport diffusif (De, porosité accessible) du noyau argileux, représentées en situation de référence, tiennent compte de l'influence potentielle de ce panache alcalin (Tableau 2.1-9).

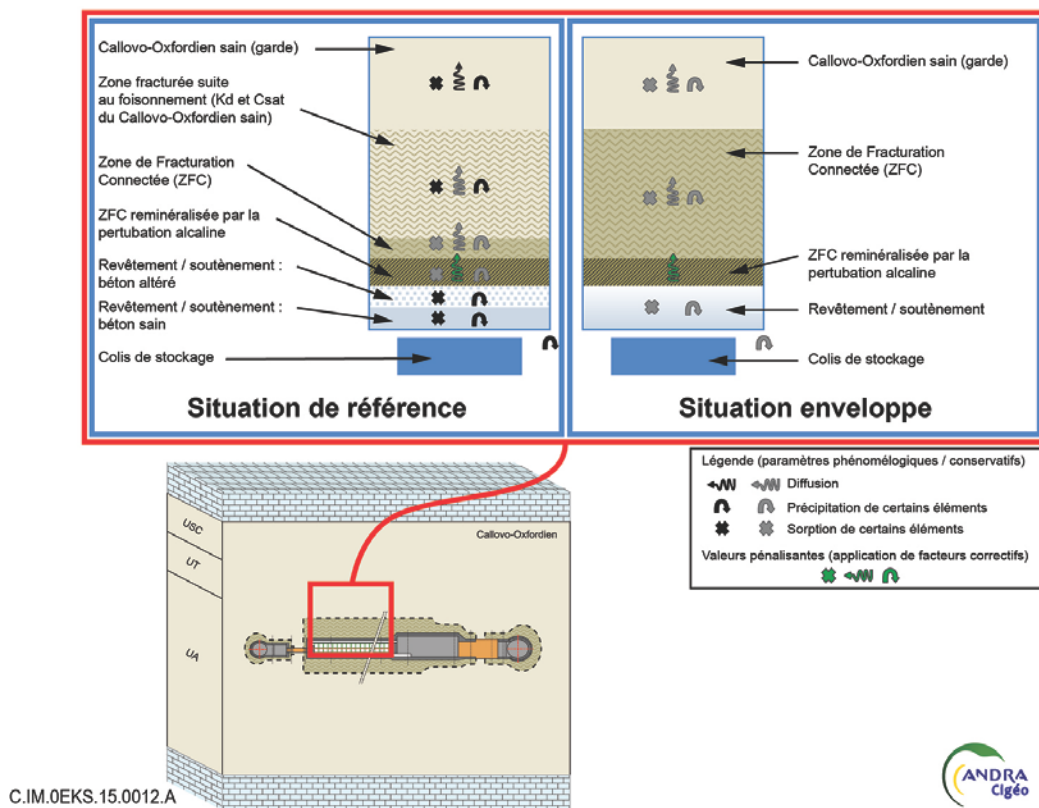


Figure 2.1-5 : Illustration schématique de l'influence de la perturbation alcaline à l'interface argilites/béton classique sur les caractéristiques de transport et rétention (exemple au droit des alvéoles MA-VL)

2.1.9.2 Perturbation liée à la présence de substances organiques complexantes

Compte tenu de l'influence des substances organiques complexantes sur la rétention, celles-ci sont prises en compte et leur effet est explicitement représenté dans le béton de revêtement et les argilites (endommagées mécaniquement ou non) au droit des alvéoles MA-VL qui en contiennent (cf. Figure 2.1-6).

Dans ces composants, l'effet de la perturbation organique est pris en compte par des facteurs correctifs appliqués aux coefficients de partage (Kd) et aux solubilités (Csat) des radionucléides excepté les radionucléides anioniques mobiles (dans les argilites) et les cations alcalins. Ces facteurs sont présentés dans le Tableau 2.1-6 pour les argilites du Callovo-Oxfordien et le Tableau 2.4-10 (en

annexe 1) pour le béton. De manière conservatrice, ils sont appliqués sur toute la durée des évaluations.

Ces facteurs correctifs sont appliqués en fonction de la concentration en molécules organiques selon leur nature (ISA ou autres ligands), tel que présenté au Tableau 2.1-6. Ces concentrations sont évaluées par des calculs préparatoires qui reposent sur l'alvéole de stockage MA-VL la plus chargée en organiques.

Pour le noyau argileux des scellements des alvéoles MA-VL, en situation de référence, les mêmes facteurs correctifs que ceux retenus pour les argilites sont appliqués.

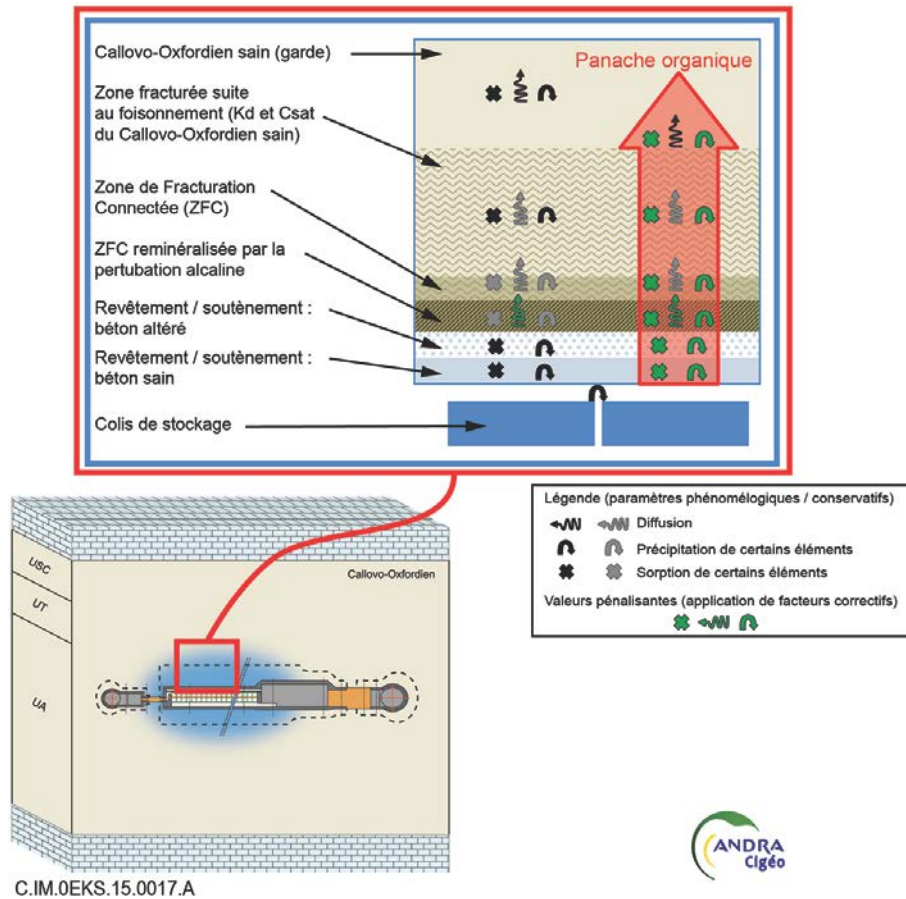


Figure 2.1-6 : Illustration schématique de la prise en compte d'un panache de complexants organiques sur les caractéristiques de transport et de rétention au droit d'un alvéole MA-VL (exemple de la situation de référence)

2.1.9.3 Perturbation saline

Pour prendre en compte l'effet des fluides salins issus de certains déchets MA-VL, des facteurs correctifs sont appliqués aux propriétés de transport et de rétention de certains radionucléides dans le revêtement-soutènement en béton des alvéoles MA-VL, dans la zone d'argilites endommagées mécaniquement (zone de foisonnement au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL) ou non au droit des alvéoles MA-VL qui en contiennent.

De manière conservatrice, ces facteurs correctifs sont appliqués sur toute la durée des évaluations.

Dans les argilites, ces facteurs correctifs sont appliqués en fonction de la force ionique obtenue par calculs préparatoires. Si la force ionique est supérieure à 2M, la rétention chimique n'est pas représentée.

L'influence de la perturbation saline sur les coefficients de diffusion dans les bétons n'est pas représentée, les coefficients de diffusion étant choisis pénalisants.

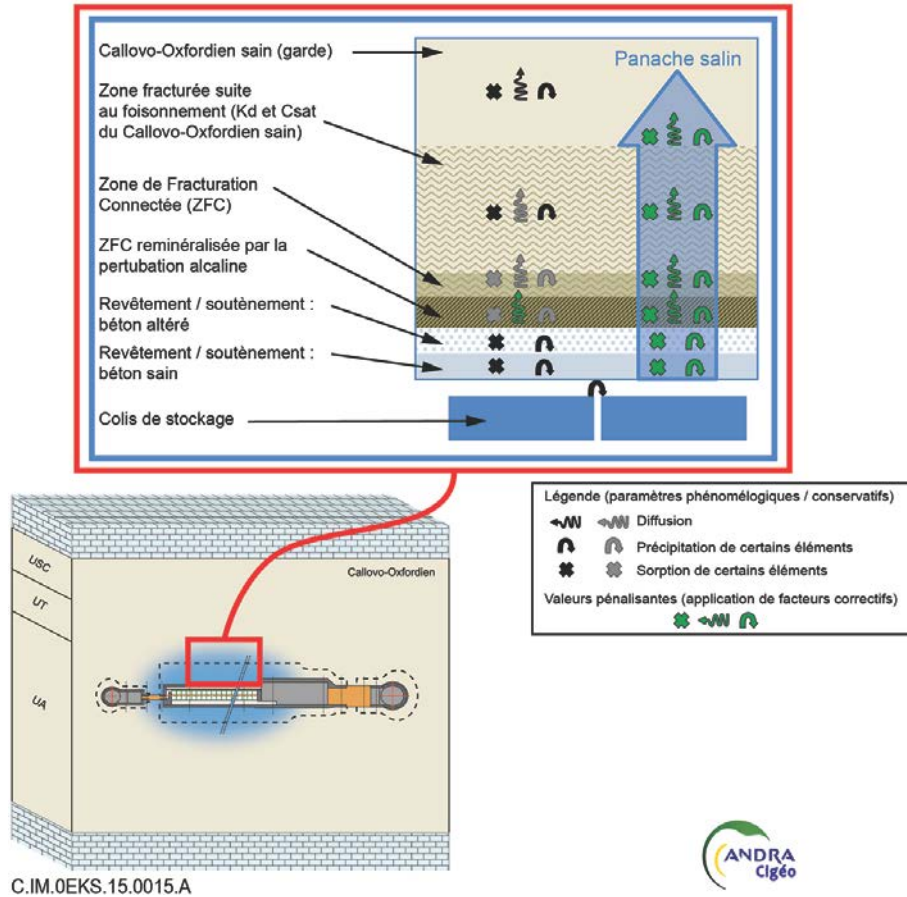


Figure 2.1-7 : Illustration schématique de la prise en compte de la perturbation saline sur les caractéristiques de transport et rétention au droit d'un alvéole MA-VL (exemple de la situation de référence)

Tableau 2.1-6 : Facteurs correctifs (F) appliqués aux paramètres de rétention et de transport en fonction des perturbations chimiques dans le Callovo-Oxfordien sain ou endommagé mécaniquement

	Radionucléides	Perturbation alcaline ou saline		Perturbation organique	
Critère extension et		Force ionique	[K] > 10 ⁻² mol.L ⁻¹	[ISA] > 1.10 ⁻⁴ mol.L ⁻¹ (ou [L]* > 1.10 ⁻³ mol.L ⁻¹)	[ISA] > 1.10 ⁻³ mol.L ⁻¹ (ou [L]* > 1.10 ⁻² mol.L ⁻¹)
Perméabilité et porosité cinématique	N/A	Sans effet	Sans effet	Sans effet	Sans effet
De	Anions	I < 0,2M : F=1 0,2M < I < 0,5M : F=1,5 0,5M < I : F=2	Sans effet	Sans effet	Sans effet
	Neutres	Sans effet			
	Cations	I < 0,2M : F=1 0,2M < I < 0,5M : F=1/1,5 0,5M < I : F=1/2			
Q _{acc}	Anions	I < 0,2M : F=1 0,2M < I < 0,5M : F=1/1,3 0,5M < I : F=1/1,5	Sans effet	Sans effet	Sans effet
	Neutres et cations	Sans effet			
Kd	Anions mobiles (Chlore 36, iode 129, aluminium 26, sélénium 79)	Pas de sorption			
	Alcalins (K, Cs)	I < 0,2M : F=1 0,2M < I < 0,5M : F=0,2 0,5M < I < 1M : F=0,1 1M < I < 2M : F=0,05 2M < I : Kd=0	[K] < 0,01M : F=1 0,01M < I < 0,1M : F=0,25 0,1M < I < 0,5M : F=0,1 I < 0,5M : F=0,04	Sans effet	
	Alcalino-terreux			F=0,1	F=0,01
	Autres RN (dont actinides et lanthanides)	Kd=0 si I > 2M	Sans effet		
C _{sat}	Anions mobiles (Chlore 36, iode 129, aluminium 26, sélénium 79)	Si I > 0,4M, F=10 Si I > 2M, C _{sat} =∞	Sans effet	Sans effet	
	Alcalins (K, Cs)				
	Alcalino-terreux				
	Autres RN (dont actinides et lanthanides)			F=10	F=100

RN : radionucléide.

2.1.10 Le quartier MA-VL

Les conteneurs de stockage MA-VL sont disposés dans des alvéoles MA-VL de stockage équipés d'un revêtement en béton.

Le quartier MA-VL est représenté selon l'architecture à terminaison présentée au chap. 3 du Volume II. Les alvéoles MA-VL sont sub-horizontaux et ils sont creusés selon la contrainte principale majeure. Leur espacement est celui défini dans l'architecture à terminaison.

Les alvéoles de stockage MA-VL sont représentés avec trois parties distinctes :

- une partie utile où sont stockés les colis de déchets ;
- un massif en béton à chaque extrémité ;
- un scellement à chaque extrémité.

Une option de conception avec un scellement d'alvéole MA-VL de performance moindre est étudiée. Elle est représentée avec des ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL de performance équivalente à celle d'un remblai.

La partie utile où sont stockés les colis de déchets est représentée sur une longueur de 500 mètres. Compte tenu de ses rôles et/ou fonctions, la conceptualisation de la partie utile des alvéoles MA-VL distingue (i) les conteneurs de stockage et les colis primaires, (ii) le béton de remplissage, (iii) le revêtement/soutènement de l'alvéole, et (iv) la zone d'argilites endommagées mécaniquement.

2.1.10.1 Les colis de stockage des déchets MA-VL

Les colis de stockage des déchets MA-VL sont constitués :

- d'un colis primaire comprenant des déchets et le cas échéant une matrice bitume et/ou cimentaire ;
- d'un conteneur de stockage en béton armé (excepté les colis de stockage CS6 et CS7). Puisqu'ils n'ont aucune fonction de sûreté après fermeture, les conteneurs de stockage MA-VL ne sont représentés que sur leur période d'intégrité mécanique, estimée à ce stade à 1000 ans. Il ne leur est attribué aucune propriété de transport ni de rétention chimique.

Les modèles de relâchement retenus sont ceux décrits au chap. 2 du Volume II.

2.1.10.2 Revêtement/soutènement en béton de la partie utile des alvéoles MA-VL de stockage de déchets MA-VL

Le revêtement/soutènement des alvéoles de stockage de colis de déchets MA-VL contribue à « limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage ». La contribution attendue est exprimée en termes d'environnement chimique favorable aux phénomènes de précipitation et de sorption.

Aucune propriété hydraulique ou de transport diffusif n'est attendue. Le revêtement/soutènement et le béton de remplissage sont ainsi représentés avec une perméabilité équivalente à celle d'un sable et des paramètres de diffusion pénalisants, sur toute la durée des évaluations, en référence et en situation enveloppe.

Toute l'épaisseur du béton de revêtement/soutènement est représentée par une zone unique. Pour chaque radionucléide, les paramètres de rétention retenus sont les moins favorables à la rétention :

- En situation de référence :
 - ✓ les coefficients de partage (Kd) sont les valeurs « phénoménologiques » (ou best estimate) les plus faibles parmi celles des bétons sains et altérés ;
 - ✓ les limites de solubilité (C_{sat}) sont les valeurs « phénoménologiques » (ou best estimate) les plus élevées parmi celles des bétons sains et altérés.
- En situation « enveloppe » :
 - ✓ les coefficients de partage sont les valeurs conservatives (Kd min) les plus faibles parmi celles des bétons sains et altérés ;
 - ✓ les limites de solubilité sont les valeurs conservatives (C_{sat} max) les plus élevées parmi celles des bétons sains et altérés.

Pour les radionucléides pour lesquels on ne dispose d'aucune mesure ni d'analogie, on ne retient pas de rétention chimique (Kd=0 et C_{sat}=∞).

Tableau 2.1-7 : Dimensions et caractéristiques de transport retenues pour le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL

	Situation de référence	Situation enveloppe
Dimensions	Revêtement-Soutènement alvéoles MA-VL : épaisseur = 0,95 mètres Tronçons de béton dans les scellements : 4 tronçons de longueur 1 mètre	
Perméabilité (K), en m/s	1.10 ⁻⁰⁶ m/s	
Porosité cinématique (ω _{cin}), sans unités	20%	
Coefficient de diffusion, en m ² .s ⁻¹	D _p = D ₀ (HTO) = 2,3.10 ⁻⁹ m ² .s ⁻¹	D _e = D ₀ (HTO) = 2,3.10 ⁻⁹ m ² .s ⁻¹
porosité accessible (ω _{acc}), sans unités	20%	

Tableau 2.1-8 : Propriétés de rétention (sorption et solubilité) des principaux radionucléides dans le béton de revêtement des alvéoles MA-VL

Radio-nucléides	Forme ionique	Coefficient de partage (Kd) en m ³ .kg ⁻¹		Limite de solubilité (C _{sat}) en moles.L ⁻¹	
		Situation de référence	Situation enveloppe	Situation de référence	Situation enveloppe
¹⁴ C	Organique	0	0	infinie	infinie
²⁶ Al	Al(OH) ₄ ⁻	0	0	3.10 ⁻⁵	1.10 ⁻³
³⁶ Cl	Cl ⁻	0,02	0	infinie	infinie
⁴⁰ K	K ⁺	0	0	infinie	infinie
⁴¹ Ca	Ca ²⁺	0,001	3.10 ⁻⁴	1,9.10 ⁻²	3.10 ⁻²
⁷⁶ Se	HSe ⁻	0	0	1,5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻³
⁹³ Mo	MoO ₄ ²⁻	0,003	10 ⁻⁴	1,5.10 ⁻⁵	3.10 ⁻⁴
¹²⁹ I	I ⁻	0,001	0	infinie	infinie
²³⁵ U ²³⁸ U	Ca ₂ UO ₂ (CO ₃) ₃ ⁰	30	3	2,2.10 ⁻⁷	7.10 ⁻⁶

2.1.10.3 Les argilites du Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles MA-VL

La zone endommagée mécaniquement est représentée selon les modalités exposées au chap. 2.1.7.

Les perturbations organiques et salines sont représentées respectivement au droit des alvéoles MA-VL contenant des déchets organiques (famille physico-chimique MA-VL 3) et des déchets salins (MA-VL 1 et 2).

Pour le panache organique, deux zones distinctes en fonction de la concentration en complexants sont représentées (cf. Figure 2.1-8) :

- une première zone de 10 mètres d'épaisseur autour du diamètre excavé de l'alvéole MA-VL, où la concentration est : $[ISA] > 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$ ou $[\text{autres ligands}] > 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$;
- une seconde zone de 2 mètres d'épaisseur autour du diamètre excavé de l'alvéole MA-VL, où la concentration est : $[ISA] > 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ ou $[\text{autres ligands}] > 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$;

Pour le panache salin, sont distinguées en fonction de la force ionique (cf. Figure 2.1-8) :

- une zone de 6 mètres d'épaisseur autour du diamètre excavé des alvéoles MA-VL de déchets de la famille physico-chimique MA-VL 1 (déchets contenant une quantité significative de sels) où la force ionique est comprise entre 0,2 et 0,5 mol.L⁻¹ ;
- une zone de 4 mètres d'épaisseur autour du diamètre excavé des alvéoles MA-VL de déchets de la famille physico-chimique MA-VL 2 (déchets bitumineux) où la force ionique est comprise entre 0,2 et 0,5 mol.L⁻¹ ;
- et une zone correspondant à une force ionique supérieure à 1 mol.L⁻¹ dans les bétons.

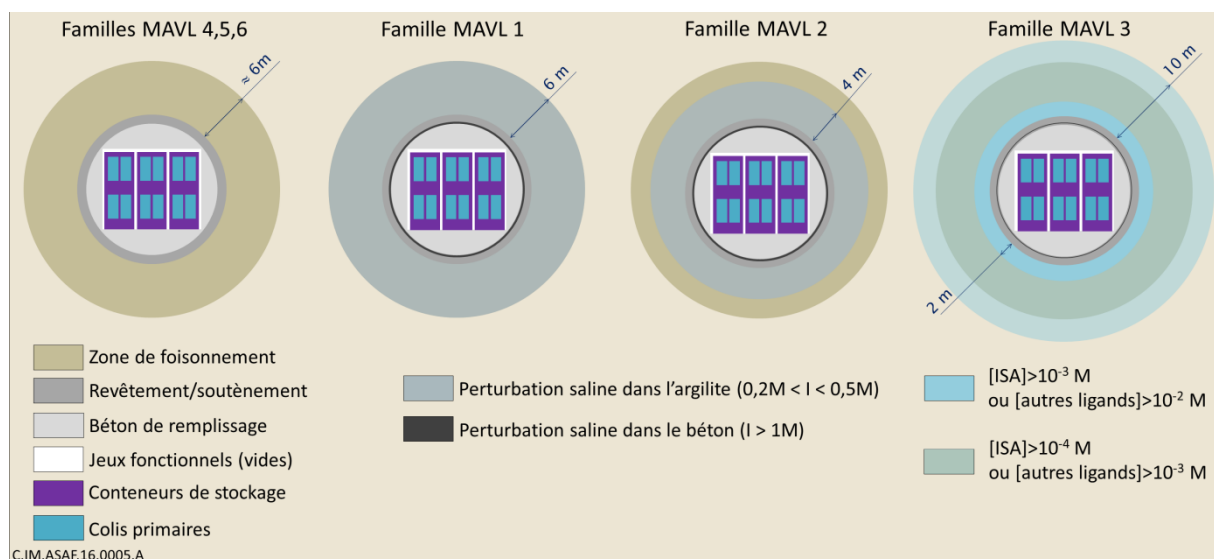


Figure 2.1-8 : Conceptualisation des panaches de perturbations chimiques autour de la partie utile des alvéoles MA-VL, en fonction du type de déchets (organiques ou salins)

Les facteurs correctifs appliqués en fonction de la perturbation affectant les argilites sont présentés dans le Tableau 2.1-6. Le transfert par colloïdes n'est pas représenté.

Les valeurs retenues pour les évaluations sont présentées dans les tableaux de synthèse fournis au chapitre 2.1.15 (Tableau 2.1-11 et Tableau 2.1-12).

2.1.10.4 Les scellements de l'alvéole MA-VL

Les scellements mis en place dans les galeries d'accès aux alvéoles MA-VL sont représentés de manière similaire aux scellements de galerie présentés au chap. 2.1.12.1. Les perturbations chimiques sont traitées de la même manière que dans le Callovo-Oxfordien.

2.1.11 Le quartier HA

Les conteneurs de stockage HA sont disposés dans des alvéoles HA de stockage équipés d'un chemisage en acier. Ils sont répartis dans des quartiers spécifiques :

- les colis de déchets faiblement exothermiques (HA0), livrés avant 2075, sont stockés dans un quartier. Les alvéoles HA0 sont conceptualisées avec une longueur de 80 mètres ;
- les colis de déchets exothermiques HA1 et HA2, livrés après 2075, sont stockés dans un quartier. Les alvéoles HA1/HA2 sont conceptualisées avec une longueur totale de 100 mètres.

Les quartiers HA sont représentés selon l'architecture à terminaison présentée au chap. 3 du Volume II. Ces ouvrages sont sub-horizontaux et ils sont creusés selon la contrainte principale majeure. Leur espacement est déterminé selon la thermicité des déchets.

Les alvéoles de stockage HA sont représentés avec deux parties distinctes :

- une partie utile où sont stockés les colis de HA et le cas échéant des intercalaires insérés entre chaque colis de stockage de déchets fortement exothermiques livrés après 2075 ;
- une tête d'alvéole HA, représentée explicitement par un matériau poreux homogène de perméabilité équivalente à celle d'un sable.

Le scénario d'évolution normale considère qu'aucun conteneur de stockage n'est défaillant au moment de la fermeture du stockage.

Le relâchement des radionucléides est initié après perte d'étanchéité du conteneur de stockage :

- en référence, la perte d'étanchéité du conteneur de stockage est évaluée à 4 300 ans en retenant une valeur haute de vitesse de corrosion (10 $\mu\text{m}/\text{an}$) définie dans les exigences applicables, une épaisseur minimale du conteneur de stockage (53 mm) et une épaisseur résiduelle de 10 mm (épaisseur minimale préservant l'étanchéité).
- en situation « enveloppe », il est retenu une durée d'étanchéité conventionnelle égale à 500 ans.

Les intercalaires implantés entre les colis de stockage fortement exothermiques sont de même diamètre que les conteneurs de stockage. Ils sont représentés sans propriété de transport et de rétention chimique.

Une représentation schématique d'un alvéole HA est présentée en Figure 2.1-9.

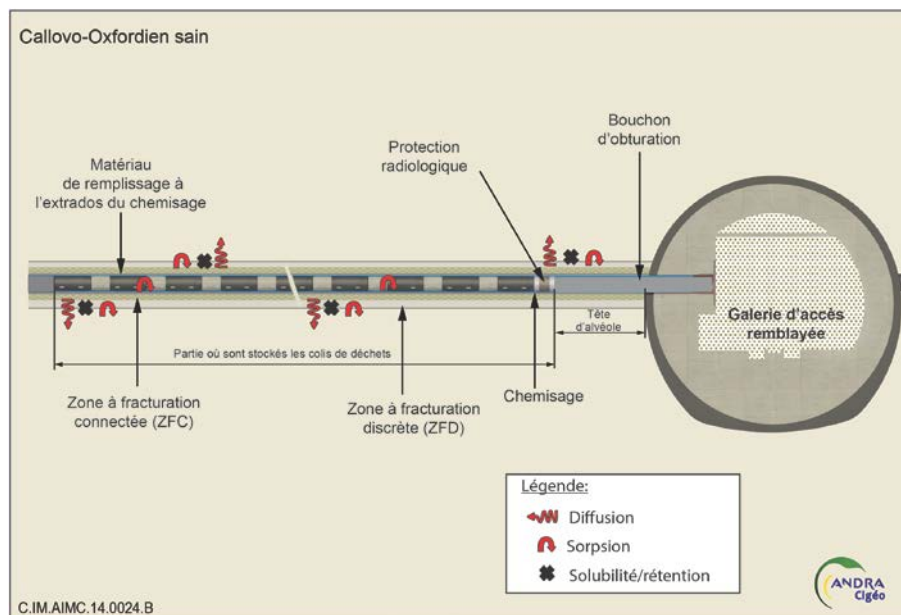


Figure 2.1-9 : Représentation schématique des alvéoles HA de stockage de colis de déchets HA et des caractéristiques de transport et rétention mobilisées

De manière conservatrice, la perturbation liée à l'infiltration du matériau de remplissage est représentée sur toute l'épaisseur de la ZFC. La ZFC est donc représentée, en référence et en situation enveloppe, avec des propriétés pénalisantes équivalentes à celles d'une ZFC reminéralisée par la perturbation alcaline (perméabilité équivalente à celle d'un sable, aucune propriété de transport ni de rétention).

Le chemisage laissé en place à la fermeture du stockage et le matériau de comblement de l'espace annulaire entre l'extrados du chemisage et le milieu géologique sont représentés de manière similaire à la ZFC reminéralisée par la perturbation alcaline.

La perturbation thermique est prise en compte suivant les modalités présentées au chap. 2.1.8.

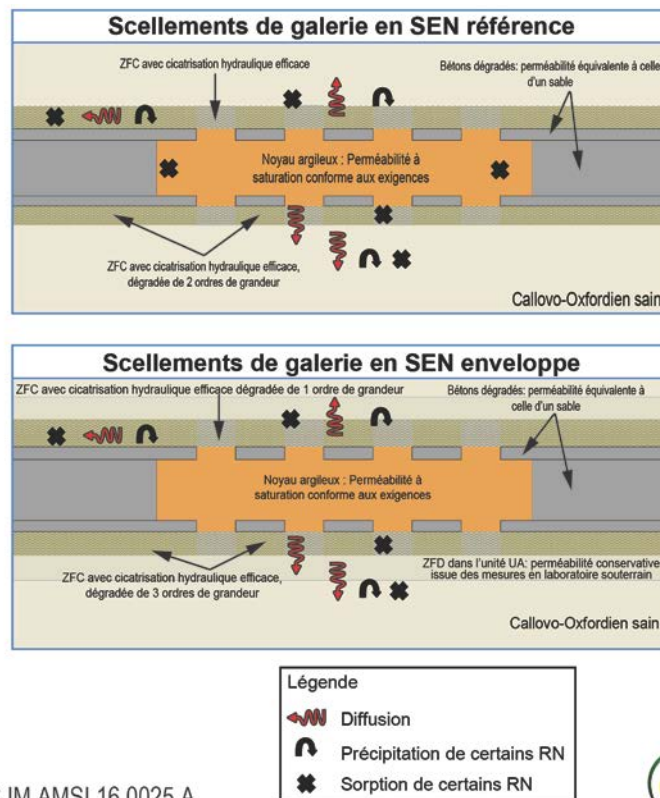
Les valeurs retenues pour les évaluations sont présentées dans le Tableau 2.1-11.

2.1.12 Les ouvrages de fermeture des galeries

2.1.12.1 Scellements de galeries

Les scellements de galerie sont constitués d'un noyau central à base d'argile gonflante de 20 mètres de longueur, confiné mécaniquement par deux massifs d'appui en béton bas pH de part et d'autre. L'interface entre le noyau de scellement et les argilites du Callovo-Oxfordien est caractérisée par une dépose partielle des voussoirs (ou revêtement), soit 4 mètres de dépose par portions de 1 mètre, remplis par le même matériau à base d'argile gonflante (Figure 2.1-10).

Les scellements de galerie sont représentés par leur rôle hydraulique exprimé par une perméabilité équivalente « en grand » de 10^{-9} m/s. Le retard par sorption dans le noyau d'argiles gonflantes n'est considéré qu'en situation de référence et non en enveloppe (Cf. Tableau 2.1-9).



C.IM.AMSI.16.0025.A

Figure 2.1-10 : Illustration schématique du choix de représentation des caractéristiques de transport et rétention dans les composants des scellements de galerie

Les scellements de galerie sont conceptualisés de la manière suivante :

- le massif d'appui est regroupé avec les voussoirs (ou revêtement) et le matériau compressible injecté à l'extrados des voussoirs en un macro-composant ;
- le noyau de scellement à base d'argiles gonflantes est représenté de manière explicite par un matériau poreux continu équivalent ;
- l'interface (avec les zones de dépose partielle) est représentée par une perméabilité équivalente calculée au travers d'une moyenne harmonique des perméabilités pondérées par les longueurs ;
- au droit du scellement sont distinguées (i) la ZFC localisée au droit des voussoirs (ou revêtements) laissés en place et (ii) la ZFC au contact direct avec le noyau argileux.

La ZFC est représentée par un matériau poreux équivalent dont la perméabilité est calculée comme la moyenne harmonique des perméabilités pondérées par les longueurs de ZFC au droit des zones de dépose.

En situation enveloppe, la ZFD est représentée par un matériau poreux de perméabilité conservative issue des mesures en Laboratoire souterrain.

Les propriétés du noyau argileux à base d'argiles gonflantes sont présentées dans le Tableau 2.1-9.

Tableau 2.1-9 : Paramètres applicables au noyau argileux à base d'argiles gonflantes

	Situation de référence	Situation enveloppe
Dimensions	Longueur du noyau argileux des scellements de galerie : 20 mètres Longueur du noyau argileux des scellements de puits : 40 mètres Longueur du noyau argileux des scellements de descenderies : <i>descenderies représentées par une partie horizontale et une partie verticales qui comporte un noyau de 40m</i>	
Porosité totale ω_r	30 %	
Perméabilité (K), en m/s	1.10^{-11} m/s	
Porosité cinématique (ω_{cin}), sans unités	Porosité totale / 2	Porosité totale / 4
Coefficient de diffusion, en $m^2.s^{-1}$	$D_p = D_0 (RN)$	$D_e = D_0$ (traceur)
porosité accessible (ω_{acc}), sans unités	Anions 5% Neutres et cations : Porosité totale	
coefficient de partage (Kd), en $L.g^{-1}$	K_{dmin} (bentonite) * fraction min smectites	$K_d=0$
limite de solubilité (C _{sat}) en $mol.L^{-1}$	Valeurs de C _{sat} dans le Callovo-Oxfordien, en situation enveloppe	$C_{sat}=\infty$

RN : radionucléide

2.1.12.2 Les galeries remblayées

La galerie remblayée comprend (Figure 2.1-11) :

- le remblai, qui n'est pas spécifié à ce stade, mais qui est considéré constitué d'une grande part d'argilites excavées et reconditionnées par broyage et criblage ;
- les voussoirs (ou revêtements) laissés en place ;
- le matériau compressible injecté à l'extrados de ceux-ci.

Des paramètres de diffusion (coefficient de diffusion effectif et porosité accessible) pénalisants sont utilisés en référence et en situation enveloppe. La rétention chimique par sorption et précipitation n'est pas représentée.

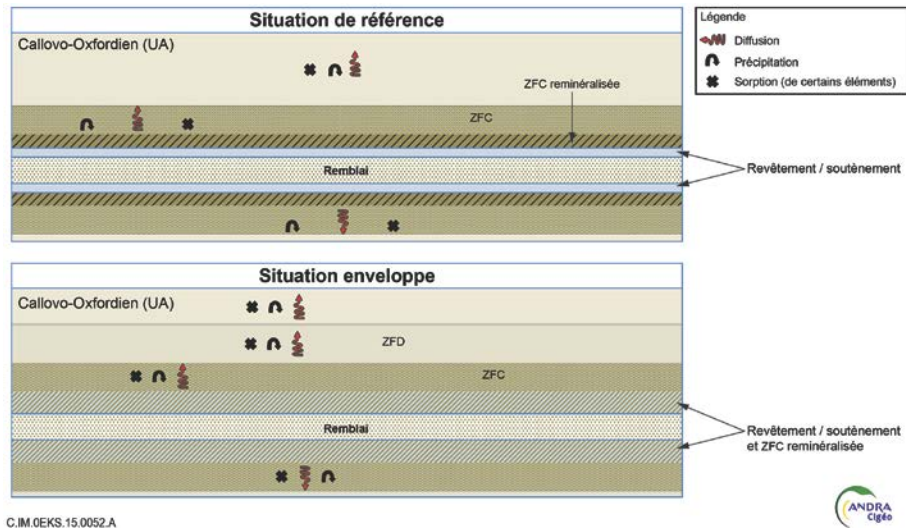


Figure 2.1-11 : Représentation schématique des composants d'une galerie remblayée, en référence et en situation « enveloppe »

Pour la conceptualisation numérique des galeries remblayées, ces trois composants sont regroupés en un macro-composant de perméabilité équivalente calculée comme la moyenne arithmétique des perméabilités pondérées par les sections respectives des différents composants (cf. Tableau 2.1-10 et Tableau 2.1-11).

Les paramètres de diffusion (coefficient de diffusion effectif et porosité accessible) pénalisants sont utilisés en référence et en situation « enveloppe ». La rétention chimique par sorption et précipitation n'est pas représentée.

Tableau 2.1-10 : Paramètres applicables aux galeries remblayées

	Situation de référence	Situation enveloppe
Perméabilité (K), en m/s	1.10 ⁻⁰⁸ m/s	
Porosité cinématique ($\omega_{p,c}$), sans unités	40%	
Coefficient de diffusion, en m ² .s ⁻¹	Dp = D ₀ (HTO)	De = D ₀ (HTO)
Porosité accessible ($\omega_{p,a}$), sans unités	Anions 20% Neutres et cations 40%	
Coefficient de distribution (Kd), en L.g ⁻¹	Kd=0	
Limite de solubilité (C _{sat}), en mol.L ⁻¹	C _{sat} =∞	

2.1.13 Les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond

Les scellements des ouvrages des liaisons surface-fond (LSF) sont mis en place lors de la fermeture du stockage, au toit du Callovo-Oxfordien dans les unités (USC et UT) où il ne se développe pas de zone endommagée avec fracturation connectée (ZFC). La tenue mécanique de la roche permet la dépose du revêtement-soutènement en paroi sur toute la longueur du noyau argileux. La ZFD et le revêtement ne sont donc pas représentés.

Les scellements de LSF sont ainsi constitués :

- d'un noyau central à base d'argile gonflante sur la totalité de la hauteur de l'horizon USC + UT pour les puits, soit 40 mètres, et sur une longueur de 100 mètres pour les descenderies ;
- de massifs d'appui de part et d'autre du noyau, en béton bas pH.

La Figure 2.1-12 et la Figure 2.1-13 illustrent les choix de représentation des scellements de puits et la Figure 2.1-14 ceux des scellements de descenderies.

Les scellements des LSF sont représentés pour leur rôle hydraulique, c'est-à-dire par une perméabilité homogénéisée à saturation du noyau et de son interface avec les matériaux à son contact. Elle est prise égale à celle spécifiée dans les exigences, soit 10^{-11} m/s.

Des coefficients de partage sont retenus en situation de référence, ils sont pris conservatifs.

Les massifs d'appui sont représentés avec une perméabilité équivalente à celle d'un sable (cf. Tableau 2.1-11). Aucune propriété de transport diffusif ni de rétention chimique n'est retenue.

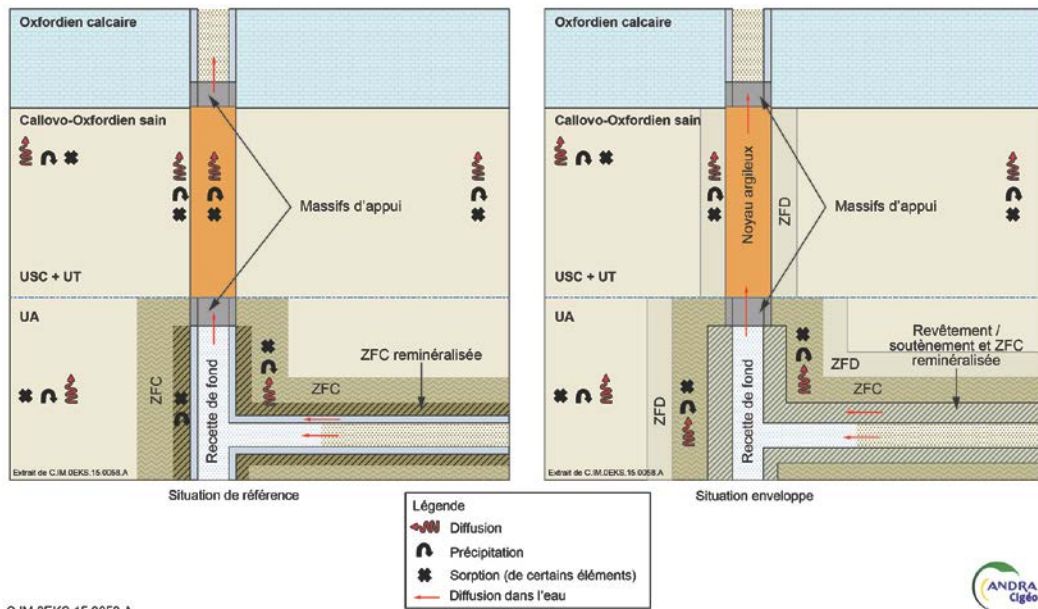


Figure 2.1-12 : Illustration schématique du choix de représentation des scellements de puits et des caractéristiques de transport et de rétention (situation de référence à gauche, situation enveloppe à droite)

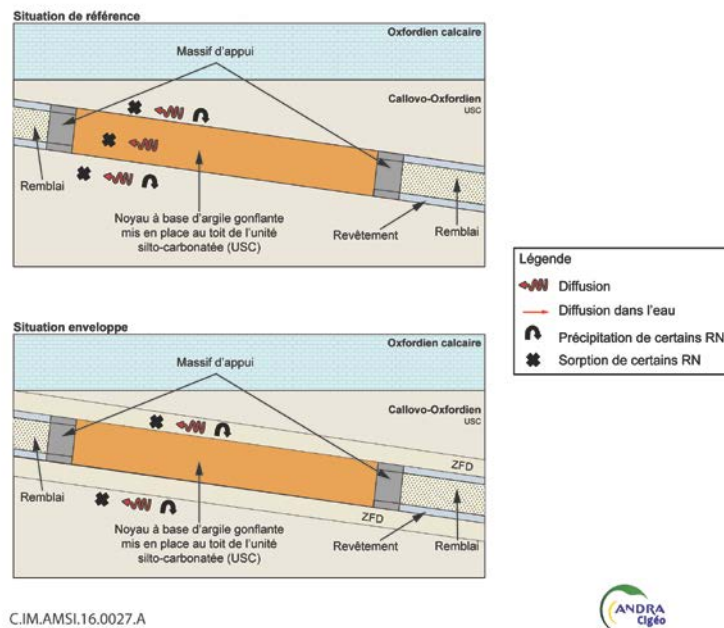


Figure 2.1-13 : Illustration schématique des choix de représentation des scellements de descenderie et des caractéristiques de transport et de rétention (situations de référence (haut) et enveloppe (bas))

2.1.14 Le remblaiement des ouvrages de liaison surface-fond

Le remplissage de la recette des puits est assuré par un matériau incompressible à base de béton standard (Figure 2.1-14).

En référence et en situation enveloppe, sa perméabilité est prise équivalente à celle d'un sable, ses paramètres de diffusion (coefficient de diffusion effectif et porosité accessible) sont pénalisants et la rétention (sorption et précipitation) n'est pas représentée (Tableau 2.1-12). Les mêmes caractéristiques sont attribuées aux voussoirs.

L'endommagement mécanique des argilites en paroi des ouvrages est représenté selon les modalités exposées au chap. 2.1.7 et illustrées à la Figure 2.1-11.

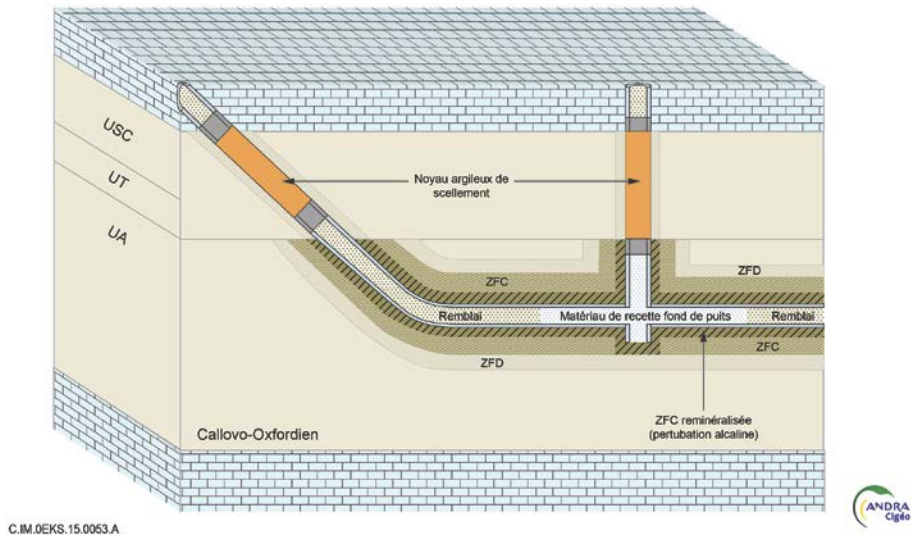


Figure 2.1-14 : Représentation schématique des ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond et des galeries : remblai, revêtement/soutènement, ZFC reminéralisée, argilites endommagées mécaniquement (ZFC et ZFD en situation enveloppe). Prise en compte des propriétés spécifiques des unités USC/UT et UA.

2.1.15 Synthèse des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés

Les tableaux présentés ci-après résument les paramètres hydrauliques et de transfert de solutés pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 dans les différents composants susceptibles de constituer une voie de transfert jusqu'au toit et au mur du Callovo-Oxfordien.

Tableau 2.1-11 : Valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés retenus pour iode 129, chlore 36 et sélénium 79

	Situation de référence					Situation enveloppe		
	Perméabilité K (m.s ⁻¹)	Coefficient de diffusion effectif De (m ² .s ⁻¹)			Porosité accessible ω _{acc} (-)	Perméabilité K (m.s ⁻¹)	Coefficient de diffusion effectif De (m ² .s ⁻¹)	Porosité accessible ω _{acc} (-)
		¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se				
Callovo-Oxfordien sain	4.10 ⁻¹⁴	3.10 ⁻¹²	5.10 ⁻¹²	5.10 ⁻¹²	0,07	Kv=2.10 ⁻¹³ Kh=3.10 ⁻¹³	6,5.10 ⁻¹²	0,05
Zone à fracturation discrète (ZFD)	N/A					UA		
						10 ⁻¹⁰	6,5.10 ⁻¹²	0,05
						USC (+ UT)		
Zone fracturée connectée (ZFC)	Galeries/ LSF (UA)/tunnels MAVL					Galeries/ LSF (UA)/tunnels MAVL		
	10 ⁻⁹	6.10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	5.10 ⁻¹²	0,07	10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻¹¹	0,05
	Micro-tunnels HA					Micro-tunnels HA		
	10 ⁻⁶	6.10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	5.10 ⁻¹²	0,07	10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻¹¹	0,05
	Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)					Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)		
4,8.10 ⁻¹¹	6.10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	5.10 ⁻¹²	0,07	4,8.10 ⁻¹⁰	1,3.10 ⁻¹¹	0,05	
Remblai de galeries	10 ⁻⁸	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	10 ⁻⁸	2,3.10 ⁻⁹	0,2
Béton revêtement/soutènement/voussoirs/remplissage/massif d'appui	10 ⁻⁶	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	10 ⁻⁶	2,3.10 ⁻⁹	0,2
Interface noyau/argillites au droit des scellements	Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)					Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)		
	5.10 ⁻¹¹	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	5.10 ⁻¹¹	2,3.10 ⁻⁹	0,2
	Scellement de puits et descenteries					Scellement de puits et descenteries		
10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	5.10 ⁻¹¹		0,05	10 ⁻¹¹	2.10 ⁻⁹	0,05	
Noyau de scellement	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰			0,05	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	0,05
Tête de micro-tunnel HA	10 ⁻⁶	6,9.10 ⁻¹⁰			0,3	10 ⁻⁶	2,3.10 ⁻⁹	0,3
Jeux inter-colis/vides apicaux	10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁹			1	10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁹	1
Colis de stockage/colis primaire	10 ⁻⁶	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	10 ⁻⁶	2,3.10 ⁻⁹	0,2

Tableau 2.1-12 : Valeurs des paramètres de rétention retenus pour iode 129, chlore 36 et sélénium 79

	Situation de référence						Situation enveloppe					
	Coefficient de partage solide/solution Kd (m ³ .kg ⁻¹)			Limite de solubilité Csat (mol.L ⁻¹)			Coefficient de partage solide/solution Kd (m ³ .kg ⁻¹)			Limite de solubilité Csat (mol.L ⁻¹)		
	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se
Callovo-Oxfordien sain	0			infinie		2.10 ⁻⁹	0			infinie		10 ⁻⁷
Zone à fracturation discrète (ZFD)	N/A			N/A			0			infinie		10 ⁻⁷
Zone fracturée connectée (ZFC)	0			infinie		10 ⁻⁷	0			infinie		10 ⁻⁷
Béton de revêtement/soutènement des tunnels MAVL	10 ⁻³	2.10 ⁻²	0	infinie		1,5.10 ⁻⁴	0			infinie		5.10 ⁻³
Noyau de scellement	0			infinie		10 ⁻⁷	0			infinie		

2.1.16 Les formations encaissantes

Les formations encaissantes n'ont pas de fonction de sûreté après fermeture. Elles sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires pour permettre la quantification des impacts potentiels.

Les principales unités géologiques de la pile sédimentaire sont représentées :

- en partie supérieure :
 - ✓ les calcaires du Tithonien (dits calcaires du Barrois) qui affleurent sur toute la zone ;
 - ✓ les marnes du Kimméridgien ;
 - ✓ les calcaires de l'Oxfordien ;
- en partie inférieure, la formation calcaire du Dogger ;

Ces formations sont représentées selon leurs caractéristiques géométriques, minéralogiques (niveaux marneux, niveaux calcaires) et hydrauliques (

Tableau 2.1-13).

Dans les niveaux calcaires, on retient en référence :

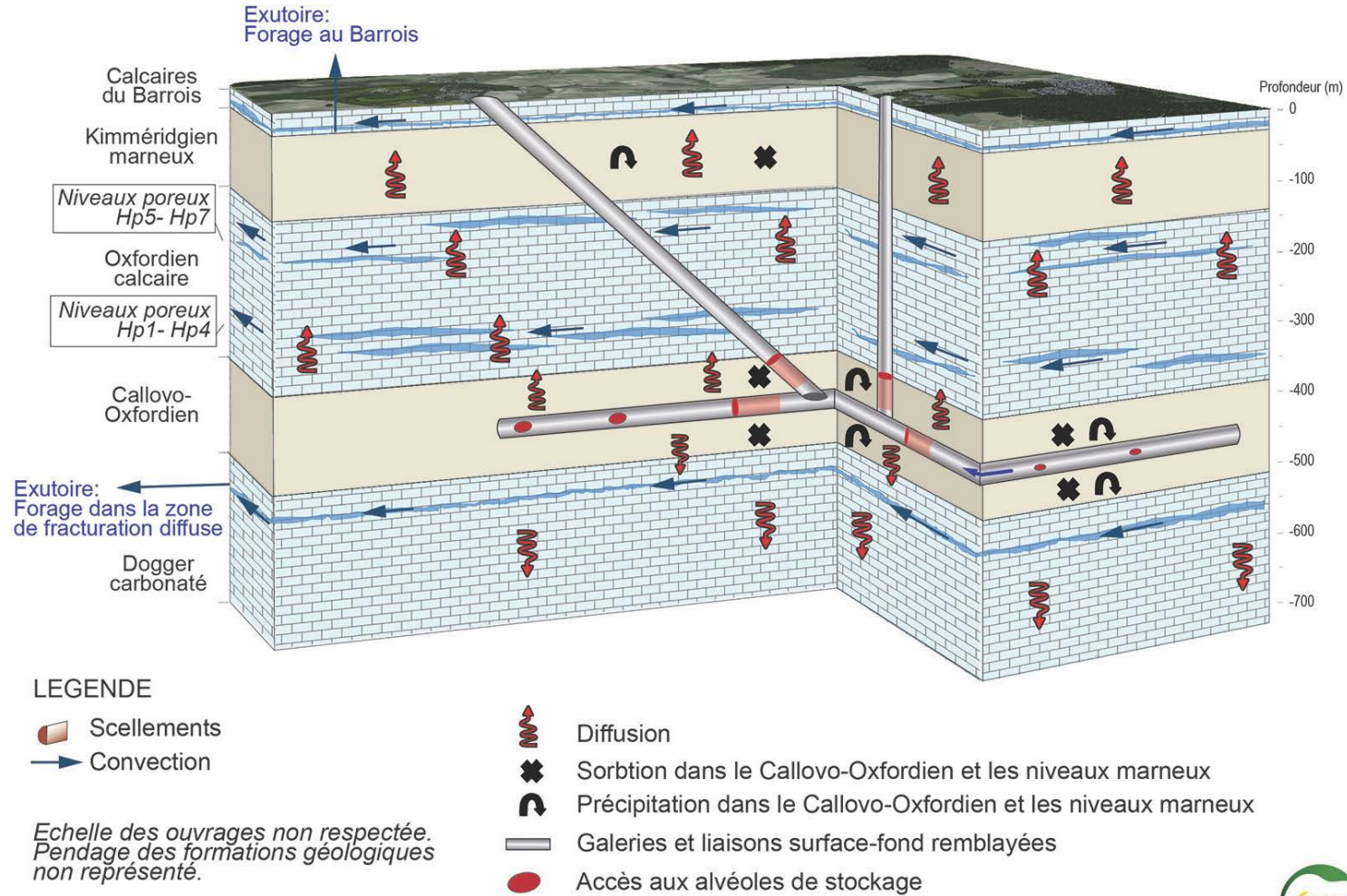
- les perméabilités mesurées en forages et intégrées dans le modèle hydrogéologique ;
- les valeurs des coefficients de diffusion mesurés dans ces niveaux calcaires. Compte tenu de la vitesse de l'écoulement dans les aquifères, la dispersion hydrodynamique est représentée ;
- les porosités cinématique et accessible, supposées égales à la porosité totale ;
- aucune propriété de rétention chimique (coefficient de partage, limite de solubilité) n'est prise en compte.

Dans les niveaux marneux, on retient en référence :

- les perméabilités mesurées dans les niveaux marneux et intégrées dans le modèle hydrogéologique ;
- les valeurs des coefficients de diffusion mesurés dans ces niveaux respectifs avec les traceurs de référence ;
- les porosités cinématiques et les porosités accessibles, définies en fonction de la porosité totale ;
- la rétention par sorption.

Dans une approche conservative, les propriétés de rétention dans les niveaux marneux ne sont pas prises en compte en situation « enveloppe ».

Compte tenu de l'absence d'évolution du sens et de l'intensité des écoulements horizontaux dans l'Oxfordien sur le prochain million d'années au droit de la ZIRA, il est pris en compte un gradient de charge horizontal d'intensité $3.10^{-3} \text{ m.m}^{-1}$ orienté vers le Nord, appliqué de manière uniforme et pérenne, en référence et en situation enveloppe.



C.IM.0EKS.15.0020.A



Figure 2.1-15 : Représentation schématique des voies de transfert dans le Callovo-Oxfordien et les encaissants supérieurs et inférieurs

Tableau 2.1-13 : Paramètres applicables aux formations encaissantes

	Situation de référence			Situation enveloppe (tous niveaux)
	Niveaux marneux	Niveaux calcaires hors HP	Horizons poreux	
Perméabilité (K), en m/s	Perméabilité variable spatialement			
Porosité cinématique (ω_{cin}), sans unités	Porosité totale / 2			Porosité totale / 4
Coefficient de diffusion, en $m^2.s^{-1}$	De(traceur)			Dp=D ₀ (traceur)
Porosité accessible (ω_{acc}), sans unités	Anions : porosité totale / 2 Neutres et cations : porosité totale	Porosité totale	Porosité totale	Porosité totale
Dispersivité, en m	Dogger et Oxfordien : $\alpha_r = 15m, \alpha_L = 100m$ Kimméridgien et Barrois : $\alpha_r = 0,3m, \alpha_L = 30m$			
Coefficient de distribution (Kd), en $L.g^{-1}$	Kd=0			
Limite de solubilité (C _{sat}) en $mol.L^{-1}$	C _{sat} =∞			

2.1.17 La biosphère

Les choix de sûreté pour modéliser les biosphères types retenues sont fondés sur la démarche décrite au volume I et son annexe 5.

2.1.17.1 Les biosphères types

Les évaluations sont présentées pour la biosphère type tempérée et la biosphère type chaude qualifiée de type Cr (subtropicale humide).

2.1.17.2 Les exutoires

La conceptualisation des biosphères types retenues prend en compte les exutoires des transferts vers les encaissants inférieurs et supérieurs. Ce sont :

- pour l'exutoire des transferts vers les encaissants inférieurs : un exutoire conventionnel par pompage dans le Dogger, à l'est de la zone de fracturation diffuse, en référence et en situation enveloppe ;
- pour l'exutoire des transferts vers les encaissants supérieurs : un puits de pompage dans le Barrois après un transfert vertical ascendant dans les formations encaissantes supérieures.

2.1.17.3 Groupes de référence hypothétique

La modélisation des transferts de radionucléides ou toxiques chimiques vers l'homme prend en compte les différentes voies d'exposition potentielles (ingestion, inhalation et exposition).

En fonction des potentialités de ces deux exutoires, deux groupes de référence hypothétiques ont été retenus à ce stade :

- pour l'exutoire Barrois, un groupe de référence hypothétique multi-activité avec irrigation de cultures céréalières. Le modèle conceptuel de ce groupe est présenté en Figure 2.1-17 ;
- pour l'exutoire Dogger, un groupe de référence hypothétique multi-activité sans irrigation de cultures céréalières. Le modèle conceptuel de ce groupe est présenté en Figure 2.1-18.

Ces groupes hypothétiques cultivent un jardin potager, possède une basse-cour et un élevage de bovin. A l'exutoire Barrois, le groupe hypothétique pratique en plus des cultures céréalières. Ils

consomment en autarcie les divers produits animaux et végétaux produits et sont soumis aux voies d'exposition par inhalation et exposition externe du fait de leurs activités extérieures.

Les biosphères sont décomposées en compartiments entre lesquels les interactions et les échanges sont identifiés. La description des voies de transfert est réalisée via la chaîne alimentaire depuis les exutoires retenus.

Les évaluations retiennent un individu représentatif de la classe d'âge adulte.

La consommation repose sur les consommations moyennes obtenues :

- par l'enquête OPE menée dans la région de Meuse/Haute-Marne pour la biosphère type tempérée ;
- par les enquêtes menées notamment en Espagne pour une biosphère analogue à la biosphère chaude retenue.

La modélisation des transferts est basée sur les quatre modèles suivants :

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

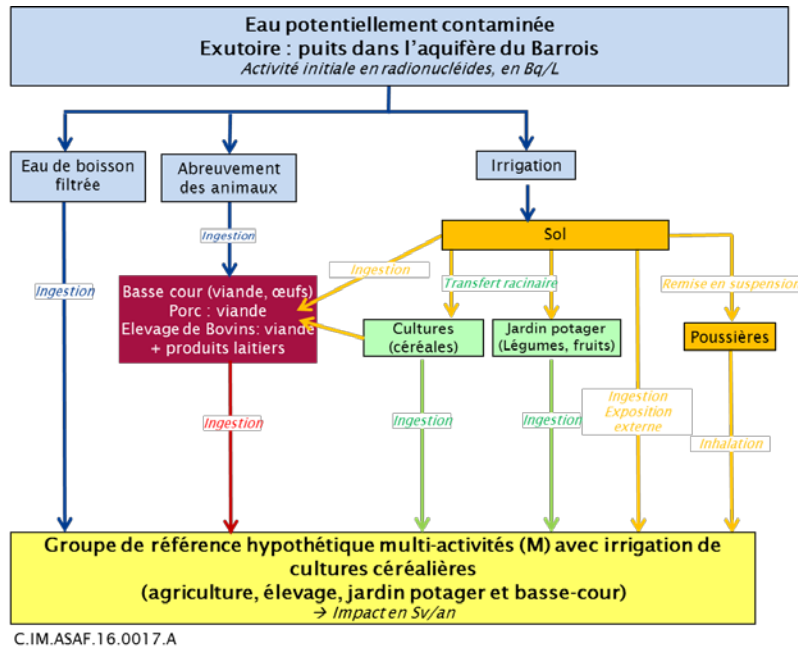


Figure 2.1-16 : Représentation conceptuelle des voies de transfert des radionucléides depuis l'eau potentiellement contaminée de l'exutoire : puits dans l'aquifère du Barrois vers un individu représentatif d'un groupe multi-activités avec irrigation de cultures céréalières

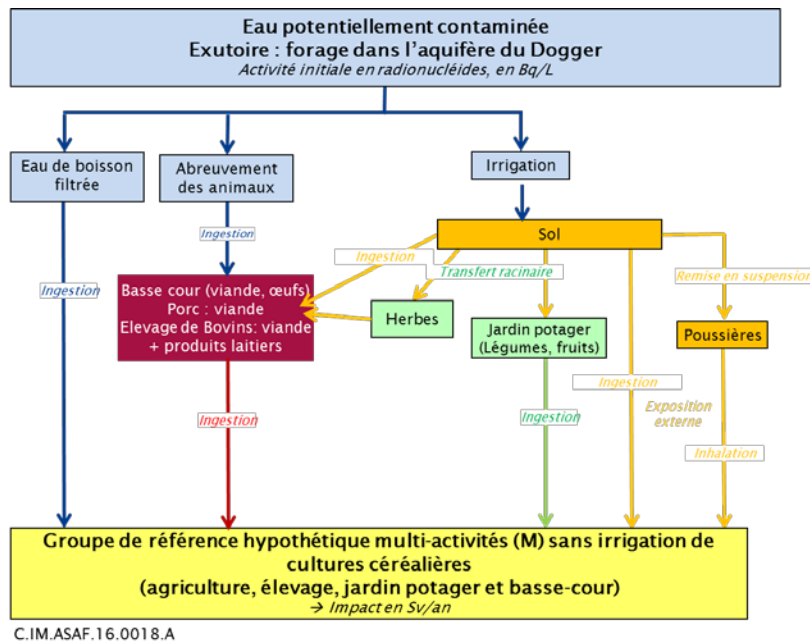


Figure 2.1-17 : Représentation conceptuelle des voies de transfert des radionucléides depuis l'eau potentiellement contaminée de l'exutoire : forage dans le Dogger vers un individu représentatif d'un groupe multi-activités sans irrigation de cultures céréalières

2.2 Traitement du SEN

2.2.1 Définition des voies de transfert

Les voies de transfert des radionucléides depuis les colis stockés jusqu'à l'homme sont représentées en Figure 2.2-1.

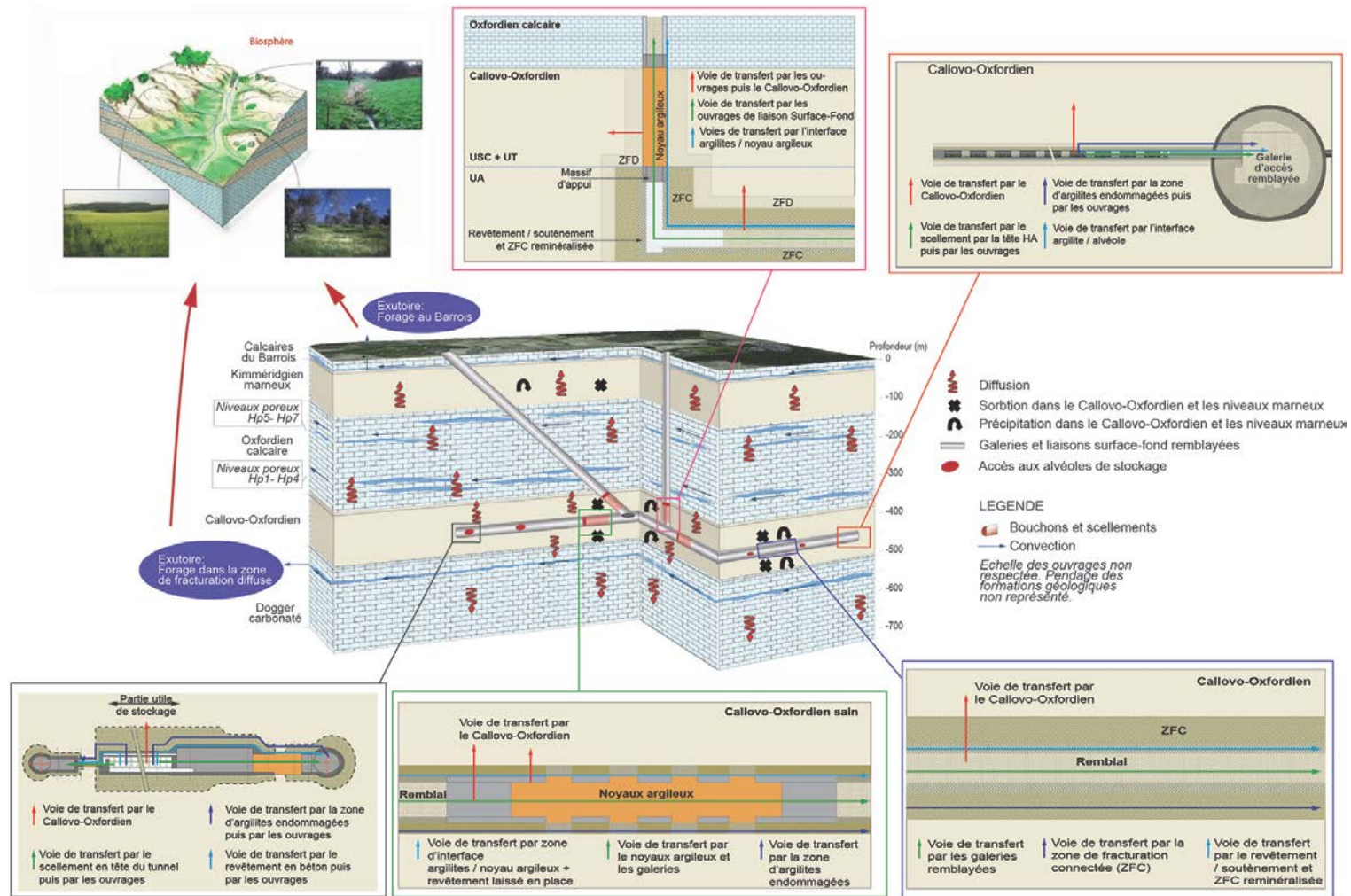
Deux voies de transfert sont identifiées :

- la première correspond à la voie de transfert qui traverse le Callovo-Oxfordien dans sa partie inférieure vers le Dogger et dans sa partie supérieure vers les formations encaissantes supérieures. Elle apparaît en rouge sur la Figure 2.2-1. Elle comprend le transfert depuis les colis stockés mais également les phénomènes de diffusion des radionucléides depuis les galeries vers les argilites ;
- la seconde correspond à la voie de transfert par les ouvrages. Elle comprend :
 - ✓ la voie de transfert dans l'alvéole de stockage puis les galeries remblayées, les scelllements et les ouvrages de liaison surface fond remblayés et scellés (en vert sur la Figure 2.2-1),
 - ✓ la voie de transfert par la zone d'argilites endommagées mécaniquement (en violet),
 - ✓ la voie de transfert par le béton de revêtement des alvéoles MA-VL et des galeries (en bleu).

Le transfert dans les formations encaissantes comporte :

- dans les encaissants inférieurs (le Dogger), un transfert hydro dispersif direct jusqu'à l'exutoire, situé dans la zone de fracturation diffuse à 9 km au sud-ouest de l'emprise du stockage ;
- dans les encaissants supérieurs, un transfert hydro dispersif dans l'Oxfordien, puis un transfert diffusif dans le Kimméridgien, puis un transfert hydro dispersif dans les calcaires du Barrois.

Le transfert de l'exutoire jusqu'à l'homme (biosphère) comporte des voies de transfert par ingestion et inhalation et l'exposition au rayonnement ionisant.



C.IM.OEKS.15.0050.B



Figure 2.2-1 : Représentation schématique des voies de transfert des colis jusqu'à l'homme

2.2.2 Les indicateurs retenus

Tel que mentionné dans le volume I, l'Andra retient comme principal indicateur de protection radiologique, la dose efficace engagée, à l'exutoire. L'Andra retient la valeur de contrainte de dose de 0,25 mSv/an en scénario d'évolution normale conformément au guide de sûreté (1).

Afin de quantifier le retard et l'atténuation des radionucléides par les phénomènes de transfert et de rétention (sorption/précipitation), de dilution et de décroissance radioactive, des indicateurs de performance sont quantifiés dans les différents composants pour les voies de transfert par les ouvrages, par le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes.

Les principaux indicateurs de performance évalués au regard des fonctions de sûreté sont :

- pour la fonction « s'opposer à la circulation d'eau », les débits d'eau dans les ouvrages remblayés et scellés ;
- pour la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », le débit molaire maximal des radionucléides et les dates d'occurrence associées. Ces débits molaires sont normés par rapport à l'inventaire initial total du radionucléide concerné (notamment en pourcentage). Ils sont calculés :
 - ✓ à différents endroits pour la voie de transfert par le stockage, dans les galeries et les liaisons surface-fond;
 - ✓ au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, pour la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.
- pour la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides », la cartographie des concentrations en solution (dans le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes) et les débits molaires (cumulés sur un million d'années) :
 - ✓ transitant des colis primaires au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, en distinguant la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien et la voie de transfert par les ouvrages ;
 - ✓ transitant dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires du Dogger et du Barrois.

Les résultats sont présentés, dans les figures uniquement pour les radionucléides dont le débit molaire excède, au cours du million d'années, 1.10^{-10} moles par an ; la contribution à l'impact des radionucléides en dessous de cette valeur étant négligeable.

2.3 Résultats du SEN

2.3.1 Résultats du SEN vis-à-vis de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau »

2.3.1.1 Situation de référence

Le champ de charges hydrauliques dans la formation du Callovo-Oxfordien est peu perturbé par le drain hydraulique que constitue l'installation souterraine. Ceci est notamment dû à la performance des scellements, en particulier des scellements des ouvrages de liaison surface-fond qui « isolent » hydrauliquement le stockage des formations sus-jacentes et des dispositions de conception de l'architecture. Les vitesses d'écoulement de l'eau au sein des ouvrages, de l'ordre de 0,5 m par 1000 ans dans les galeries d'accès aux quartiers HA et 0,25 mm par an à la sortie des quartiers MA-VL. L'essentiel de l'eau drainée par les ouvrages de liaison surface-fond provient du quartier MA-VL.

Le débit d'eau sortant de l'ensemble des ouvrages de liaison surface-fond est de l'ordre de 6 litres par an, répartis comme suit :

- 2 litres par an dans les descenderies ;
- 0,9 litres par an dans la zone de puits 1 (puits situés à proximité de la zone MA-VL) ;
- 3 litres par an dans la zone de puits 2 (puits situés à proximité de la zone HA).

Les conditions de transfert dans le stockage restent diffusives.

2.3.1.2 Situation enveloppe (avec un gradient de charge hydraulique favorable aux écoulements ascendants)

Le comportement hydraulique du stockage et du Callovo-Oxfordien est similaire à celui en référence. En revanche, compte tenu des paramètres hydrauliques conservatifs en situation enveloppe, les débits d'eau en sortie des ouvrages de liaison surface-fond sont plus importants, de l'ordre de 70 litres par an, répartis comme suit :

- 28 litres par an dans les descenderies ;
- 12 litres par an dans la zone de puits 1 (puits situés à proximité de la zone MA-VL) ;
- 30 litres par an dans la zone de puits 2 (puits situés à proximité de la zone HA).

Néanmoins, cette augmentation des débits d'eau¹⁰³ ne modifie pas les conditions de transfert au sein du stockage qui restent diffusives.

2.3.2 Résultats du SEN vis-à-vis de la fonction la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »

2.3.2.1 Situation de référence

Relâchement des radionucléides dans la zone MA-VL

Pour mémoire, le relâchement des radionucléides repose sur l'hypothèse de l'inventaire présenté au chapitre 2.2 du volume II et sur les options de sûreté relatives aux modèles de relâchement présentées au chap.2.3.3 du volume II.

Les résultats, présentés Figure 2.3-1 indiquent que la majeure partie de l'inventaire en radionucléides mobiles (96% de la quantité totale d'iode 129, 80% du chlore 36 et 98% du sélénium 79) est relâchée sous forme labile.

Le reste de l'inventaire est relâché progressivement jusqu'à environ 75 000 ans (en lien avec les modèles de relâchement de déchets métalliques) :

- relâchement graduel et limité jusqu'à 1000 ans pour les boues bitumées (durée d'intégrité des conteneurs de stockage), en lien avec l'application du modèle COLONBO ;
- relâchement par palier autour de 3 000 ans pour les déchets MA-VL vitrifiés ;
- relâchement par palier autour de 12 500 ans pour les coques et éclats en zirconium ;
- relâchement par palier autour de 13 500 ans pour les alliages zirconium-niobium ;
- relâchement par palier autour de 15 000 ans pour les éléments en nickel.

¹⁰³ L'écart par rapport à la situation de référence est lié aux paramètres hydrauliques qui sont pris conservatifs en situation enveloppe.

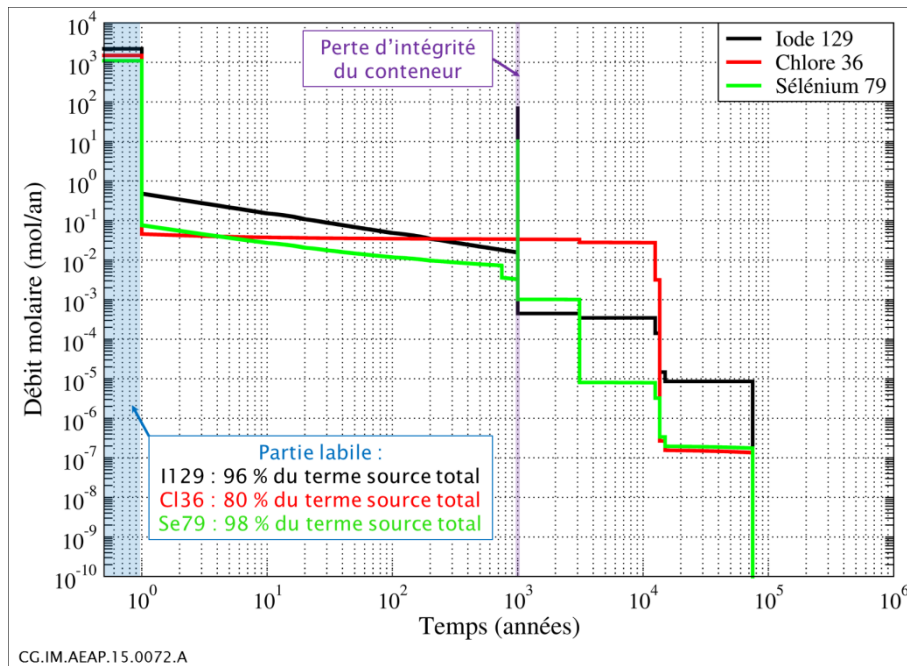


Figure 2.3-1 : SEN-situation de référence : Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier MA-VL

Relâchement des radionucléides dans la zone HA

L'évolution des termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier HA (familles HA1/HA2 et HA0) est présentée par la Figure 2.3-2. Après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage HA¹⁰⁴, l'application du modèle de relâchement « $V_0 \rightarrow V_R$ » aboutit à une durée du terme source d'environ 300 000 ans.

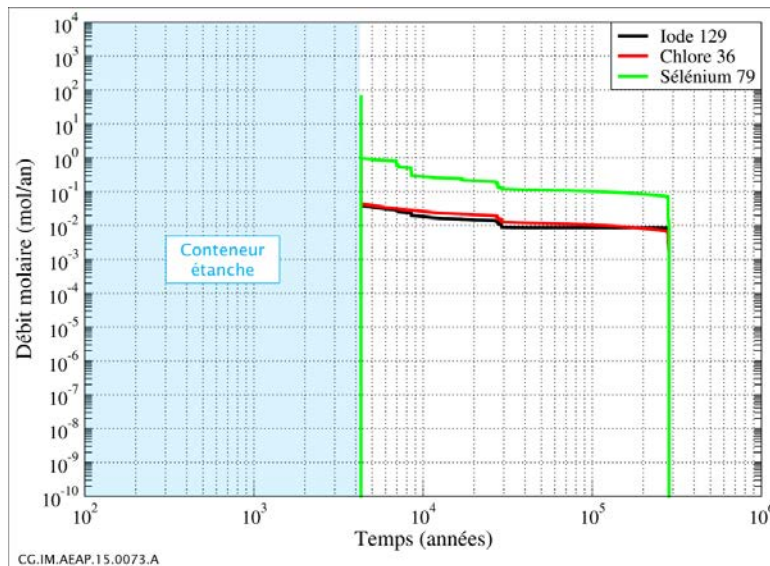


Figure 2.3-2 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence -Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier HA

¹⁰⁴ Évaluée à 4.300 ans selon l'évolution phénoménologique et avec l'épaisseur retenue au stade de l'APS

2.3.2.2 Situation « enveloppe »

Relâchement des radionucléides dans la zone MA-VL

La Figure 2.3-3 présente l'évolution des termes sources totaux en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 en fonction du temps dans le quartier MA-VL.

La majeure partie des radionucléides (99% de la quantité totale d'iode 129, 82% du chlore 36 et 99% du sélénium 79) est relâchée sous forme labile. L'augmentation de ces quantités labiles par rapport à la situation de référence est liée notamment au fait que le modèle COLONBO pour les enrobés bitumineux n'est pas appliqué.

Pour le reste de l'inventaire radiologique des colis de déchets MA-VL, les paliers sont plus précoces, intervenant autour de 15 - 20 ans. Ils correspondent à la fin du relâchement des déchets MA-VL vitrifiés représentés par un modèle $V_0.S$, moins performant qu'en situation de référence.

Le deuxième palier autour de 15 000 ans est similaire à celui de la situation de référence (coques et embouts en zirconium, alliages zirconium-niobium, et éléments en nickel). De même, le terme source cesse après 75 000 ans, après la dégradation des déchets en acier inoxydable.

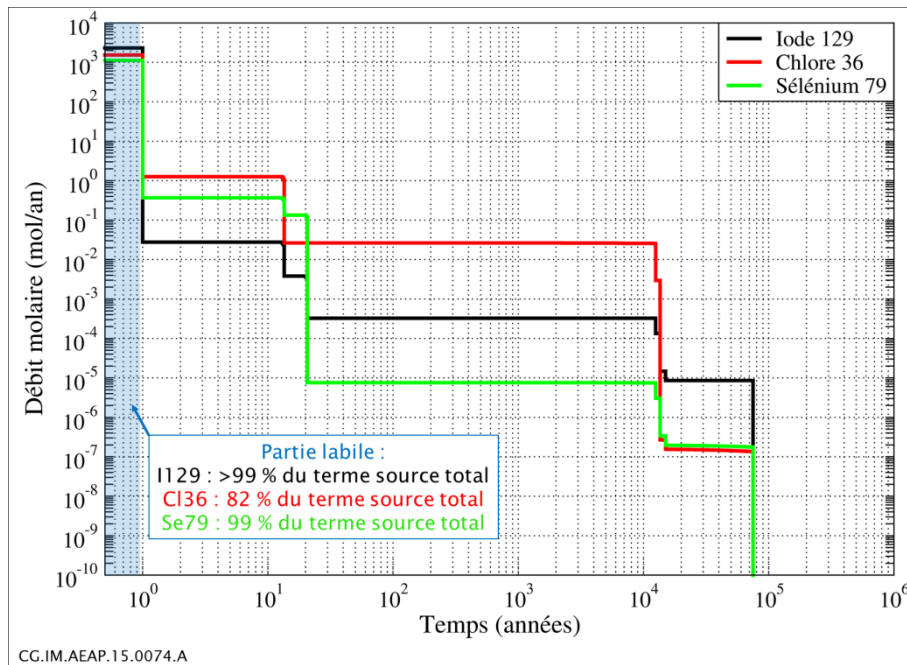


Figure 2.3-3 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier MA-VL

Relâchement des radionucléides dans la zone HA

La durée d'étanchéité des conteneurs de stockage HA est prise conventionnellement égale à 500 ans. L'évolution des termes source en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier HA (familles HA1/HA2 + familles HA0) est présentée par la Figure 2.3-4.

L'application du modèle de relâchement « $V_0.S$ », moins performant que le modèle « $V_0 \rightarrow V_R$ » retenu en référence, conduit à une durée du terme source plus courte (entre environ 10 000 et 20 000 ans).

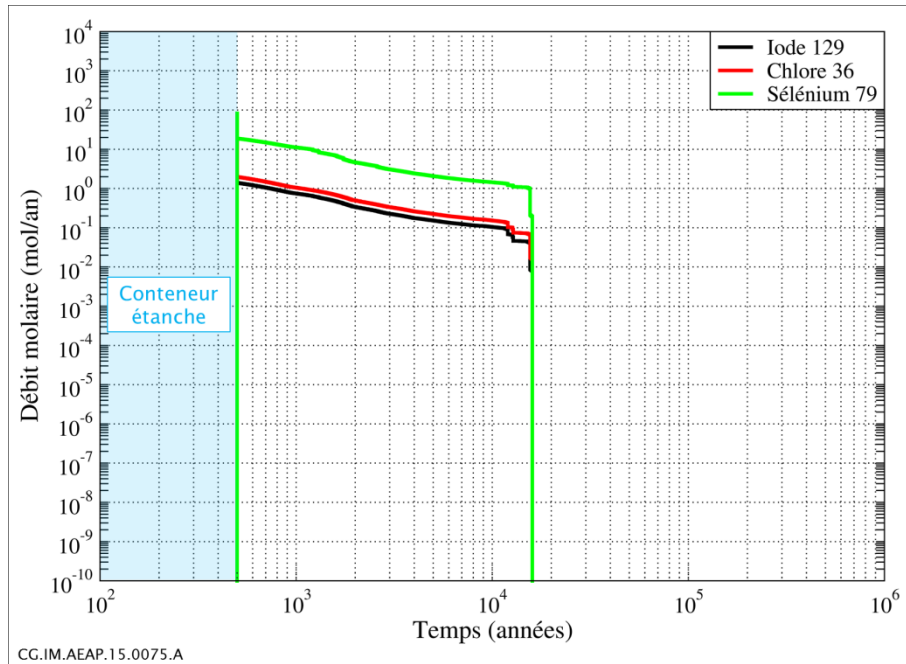


Figure 2.3-4 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier HA

2.3.3 Résultats du SEN vis-à-vis de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »

2.3.3.1 Situation de référence

Des colis au toit et au mur du Callovo-Oxfordien

▪ Analyse des débits molaires en sortie du Callovo-Oxfordien pour l'iode 129 et le chlore 36

La Figure 2.3-5 présente l'évolution des débits molaires en iode 129 et en chlore 36 au toit et au mur du Callovo-Oxfordien. Le Tableau 2.3-1 présente les bilans des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert Callovo-Oxfordien et ouvrages. Il en ressort les observations suivantes :

- les transferts sont à diffusion dominante. A l'échelle des quartiers HA et MA-VL et sur une période d'un million d'années, les transferts par convection sont d'environ deux ordres de grandeur inférieurs aux transferts par diffusion ;
- les débits molaires au toit et au mur du Callovo-Oxfordien sont presque identiques car les ouvrages sont localisés au milieu de la formation hôte et la diffusion est le mode de transfert dominant ;
- les débits molaires maximum d'iode 129 et du chlore 36, sommés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, sont respectivement de l'ordre de 10^{-3} mole par an après 840 000 ans et $5 \cdot 10^{-4}$ mole par an après 440 000 ans ;
- en sortie des ouvrages de liaison surface-fond, les débits molaires maximums en iode 129 et en chlore 36 sont très inférieurs aux débits molaires au toit du Callovo-Oxfordien, et ce d'un facteur d'environ respectivement 30 000 pour l'iode et 1 000 000 pour le chlore ;
- après un million d'années, 22% de l'iode 129 initial et 9% du chlore 36 initial ont atteint les limites du Callovo-Oxfordien¹⁰⁵. Le reste est encore présent dans le Callovo-Oxfordien ou a disparu par décroissance radioactive ;

¹⁰⁵ Les différences de comportement entre l'iode 129 et le chlore 36 sont imputables à la différence de mobilité de ces deux radionucléides dans le Callovo Oxfordien, à la sorption du chlore dans le béton de soutènement-.../...

- l'occurrence du débit molaire maximum au droit du quartier MA-VL précède celle des quartiers HA. Deux paramètres y contribuent : la durée du relâchement, beaucoup plus longue pour les colis de déchets HA que pour les colis de déchets MA-VL, et les temps de transfert par la voie Callovo-Oxfordien qui dépendent de son épaisseur plus importante au droit des quartiers HA.

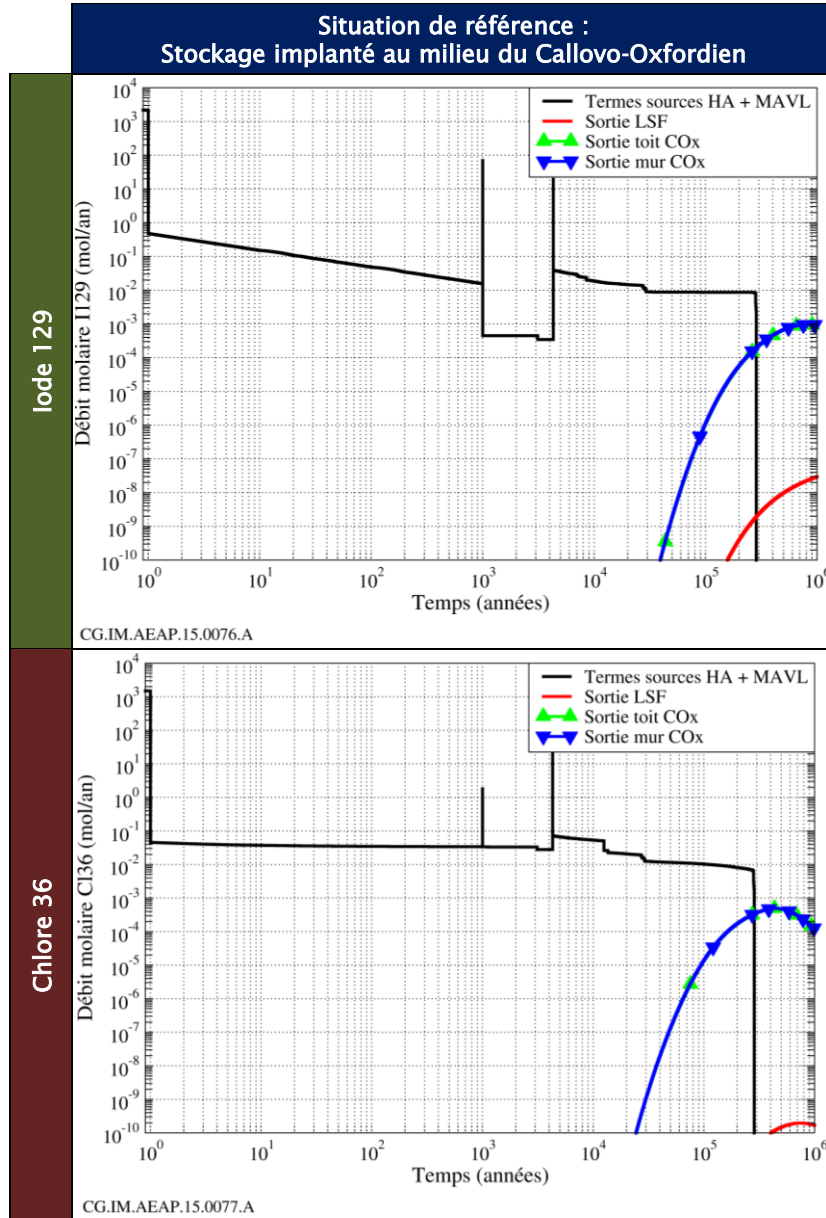


Figure 2.3-5 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence - Historique des débits molaires en iode 129 (en haut) et chlore 36 (en bas) sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien (toit et mur)

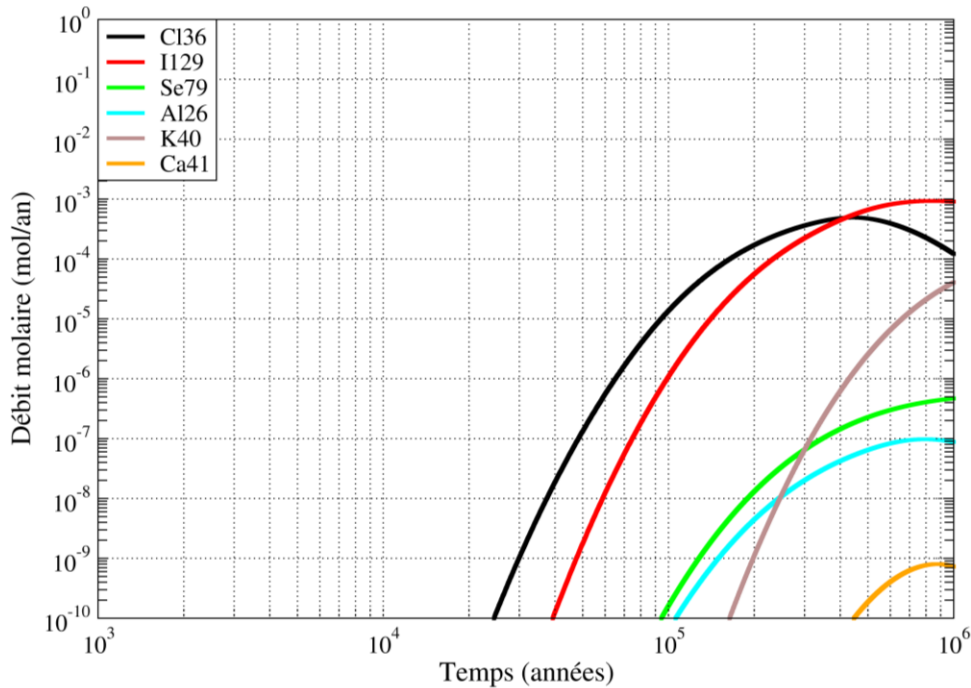
revêtement des alvéoles MA-VL et à la période du chlore 36 qui permet de bénéficier d'une décroissance radioactive supérieure à celle de l'iode 129.

Tableau 2.3-1 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence - Bilan des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert Callovo-Oxfordien et ouvrages

	Iode 129			Chlore 36		
	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles HA/MA-VL	5 000 moles			5 800 moles		
Dont HA	54 %			68 %		
Dont MA-VL	46 %			32 %		
Au toit du Callovo-Oxfordien	11 %	930	840	4,6 %	490	440
Dont HA	6,1 %	550	850	3,9 %	430	450
Dont MA-VL	4,9 %	380	810	0,7 %	70	340
Par la voie ouvrages	< 10 ⁻³ %	0,03	> 1000	< 10 ⁻⁵ %	2.10 ⁻⁴	750
Dont HA	< 10 ⁻⁴ %	0,002	> 1000	< 10 ⁻⁵ %	2.10 ⁻⁴	710
Dont MA-VL	< 10 ⁻³ %	0,03	> 1000	< 10 ⁻⁶ %	3.10 ⁻⁵	> 1000
Au mur du Callovo-Oxfordien	11 %	950	840	4,6 %	490	440
Dont HA	6,1 %	550	850	3,9 %	430	450
Dont MA-VL	5,1 %	400	810	0,7 %	70	340

▪ **Analyse des débits molaires en sortie du Callovo-Oxfordien pour les autres radionucléides**

La Figure 2.3-6 présente l'évolution des flux des principaux radionucléides mobiles au toit du Callovo-Oxfordien. Les flux au mur du Callovo-Oxfordien sont presque identiques, compte tenu du fait qu'en situation de référence, les ouvrages sont placés au milieu du Callovo-Oxfordien.



CG.IM.AEAP.15.0078.A

Figure 2.3-6 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence : historique des débits molaire au toit du Callovo-Oxfordien (les débits molaire sont identiques au mur du Callovo-Oxfordien)

Le débit molaire des radionucléides mobiles (excepté le chlore 36) en sortie du Callovo-Oxfordien atteint son maximum après environ 1 million d'années.

L'atténuation du sélénium 79, supérieure à celle de l'iode 129 et du chlore 36, est due à la solubilité du sélénium qui tend à étaler dans le temps la diffusion dans le Callovo-Oxfordien.

Outre les radionucléides mobiles (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), d'autres radionucléides ont un débit molaire qui excède 10^{-10} mole par an en sortie du Callovo-Oxfordien : l'aluminium 26 de faible inventaire, mobile et peu soluble dans les argilites ainsi que le calcium 41 et le potassium 40, faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et les argilites.

Tous les autres radionucléides sont totalement atténués avant d'atteindre les encaissants du Callovo-Oxfordien, soit du fait de leur période, très inférieure au temps de transfert, soit du fait de leur sorption dans les argilites. La Figure 2.3 7 montre que la forte sorption des actinides conduit à immobiliser dans le stockage et en champ proche des alvéoles de stockage l'uranium 238 et le neptunium 237 sur une distance maximale d'environ 10 m.

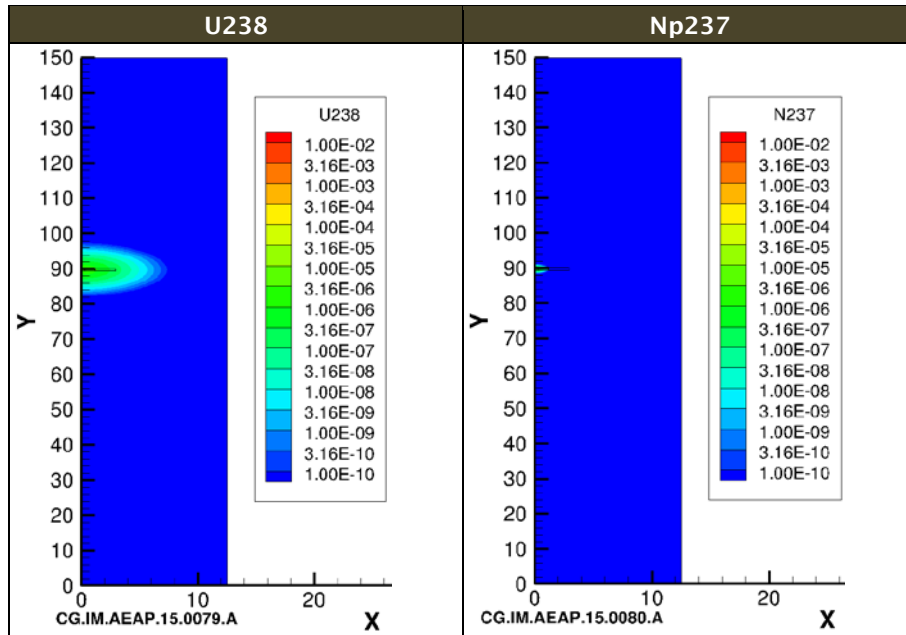


Figure 2.3-7 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence - Panaches de concentration uranium 238 et neptunium 237 (en mole/m³ d'eau) dans les argilites du Callovo-Oxfordien autour d'un alvéole HA à 1 million d'années

▪ **Analyse du transfert de l'iode 129 et du chlore 36 issus des zones HA et MA-VL**

La Figure 2.3-8 donne l'évolution des débits molaires en iode 129 et chlore 36 relâchés par les colis HA et MA-VL et migrant par le Callovo-Oxfordien et par la voie ouvrages. Les débits molaires sont déterminés au niveau des galeries d'accès (zone HA), des galeries de liaison, de la zone principale et de la sortie des ouvrages de liaison surface-fond.

Ces graphes permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- comme évoqué au chap. 2.3.2.1, le relâchement des radionucléides intervient entre 4300 (date de perte d'étanchéité du conteneur) et 300 000 ans pour les déchets HA et pendant environ 75 000 ans pour les déchets MA-VL ;
- les débits molaires en entrée de galerie présentent un retard limité par rapport au relâchement des radionucléides. La prise en compte du coefficient de partage dans le revêtement/soutènement des alvéoles MA-VL, plus élevé pour le chlore que pour l'iode, permet de bénéficier d'un retard et d'un étalement temporel du transfert, et de retarder de plusieurs milliers d'années l'occurrence du maximum de débit molaire en sortie des alvéoles MA-VL ;
- l'atténuation du débit molaire maximal est d'environ 2 ordres de grandeur en sortie de quartier HA, 4 ordres de grandeur en sortie de zone HA et 5 ordres de grandeur en sortie des liaisons surface-fond ;
- le débit molaire maximum par la voie ouvrages n'est atteint qu'après 2 millions d'années pour l'iode et 75 000 ans pour le chlore. Ces temps de transfert s'expliquent par la longueur cumulée de la voie ouvrages et le régime hydraulique très faible. En effet, la diffusion est dominante dans les galeries et les liaisons surface-fond ;
- les débits molaires en iode 129 sortant des puits et des descenderies proviennent essentiellement du quartier MA-VL. Cela est dû au fait que l'inventaire en iode 129 du quartier MA-VL est principalement positionné en entrée de quartier.

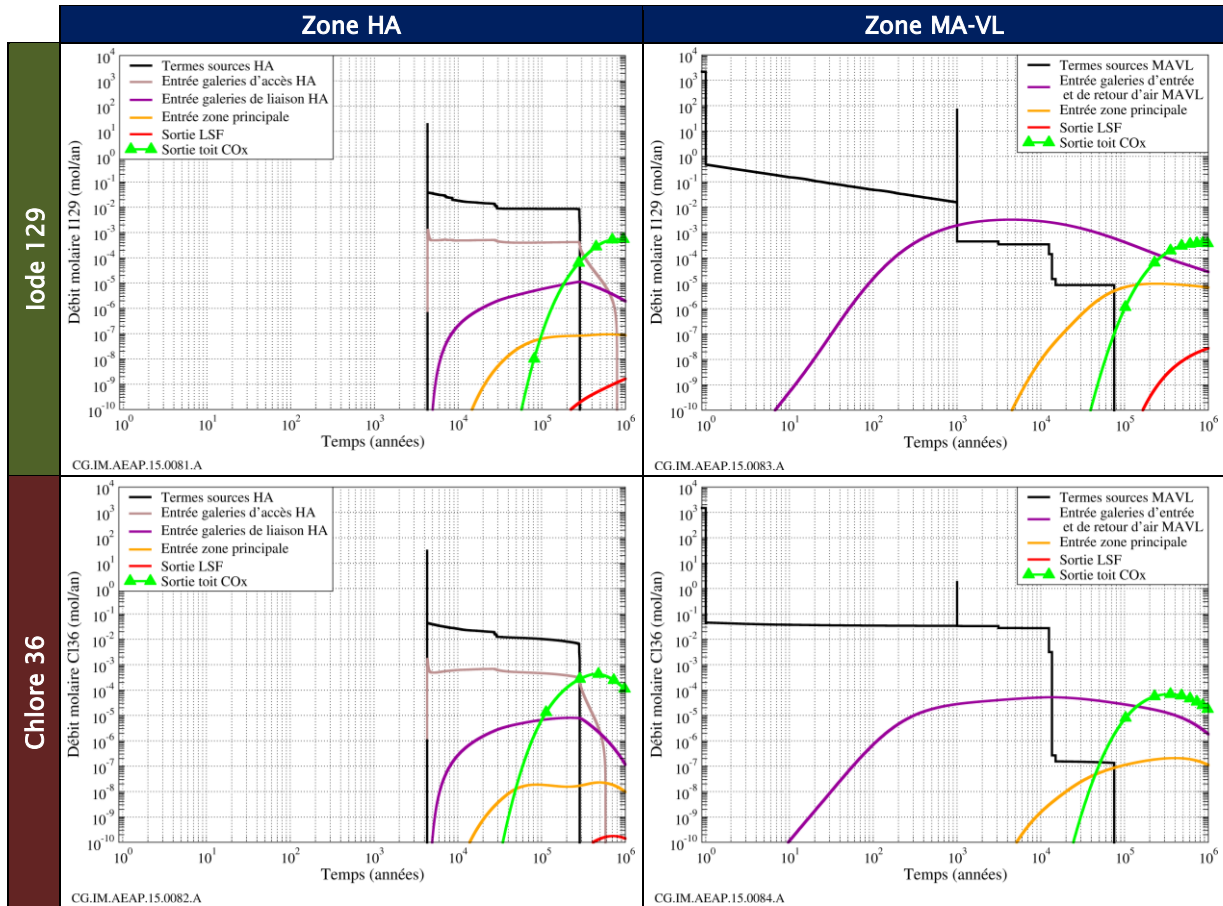


Figure 2.3-8 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence, quartiers HA (à gauche) et quartier MA-VL (à droite). Historiques des débits molaire en iode 129 (en haut) et chlore 36 (en bas) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien (au toit).

Le Tableau 2.3-2 donne le bilan des débits molaire en iode 129 et en chlore 36 cumulés sur 1 million d'années en différents endroits au long de la voie ouvrages et en sortie toit du Callovo-Oxfordien. Ces débits molaire sont normés par rapport à l'inventaire initial des quartiers HA et du quartier MA-VL.

Ces données permettent de dresser les conclusions suivantes :

- pour les quartiers des alvéoles HA, la voie de transfert principale est le Callovo-Oxfordien, puisque sur un million d'années, seulement 5 % de l'inventaire initial en iode 129 (3 % pour le chlore 36) entre dans les galeries d'accès. Cette prépondérance de la voie de transfert par les argilites à l'échelle de l'alvéole HA s'explique par la longueur hectométrique de la partie utile des alvéoles HA et l'absence de drain hydraulique dans les galeries. Le transfert lent et principalement diffusif, associé à la longueur des galeries, favorise le transfert des radionucléides des galeries vers le Callovo-Oxfordien. Ainsi, seulement 0,2 % de l'inventaire initial en iode 129 (0,08% pour le chlore 36) sortent des quartiers HA vers les galeries de liaison. Cette fraction est encore plus réduite en sortie des liaisons surface-fond à des valeurs inférieures à 0.01% ;
- pour le quartier MA-VL¹⁰⁶, seulement 8,6 % de l'inventaire initial en iode 129 (0,6% de celui en chlore 36) entrent dans les galeries de liaison d'accès et de retour d'air remblayées et la voie de transfert principale reste le Callovo-Oxfordien. En sortie du quartier MA-VL, dans les galeries et les liaisons surface-fond, le transfert des radionucléides s'effectue en régime hydraulique lent et à diffusion dominante ce qui favorise le transfert des radionucléides vers le Callovo-Oxfordien. Ainsi, seulement 0,3 % de l'inventaire initial en iode (moins de 0.01% de celui en chlore) sort du quartier MA-VL par la voie ouvrages. Les fractions d'iode 129 et de chlore 36 sortant des liaisons surface-fond sont bien inférieures à 0.001%.

Tableau 2.3-2 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence : bilan des débits molaires d'iode 129 et de chlore 36 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire initial des quartiers HA et du quartier MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien (au toit)

% de l'inventaire total initial de la zone HA	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone principale	Sortie des LSF	Sortie toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129	5 %	0,2 %	< 10 ⁻² %	< 10 ⁻⁴ %	11 %
Chlore 36	3,3 %	0,08 %	< 10 ⁻³ %	< 10 ⁻⁵ %	5,8 %
% de l'inventaire total initial de la zone MA-VL	Entrée dans les galeries de liaison/accès et retour d'air		Entrée zone principale	Sortant des LSF	Sortie toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129	8,6 %		0,3 %	< 10 ⁻³ %	10 %
Chlore 36	0,6 %		< 10 ⁻² %	< 10 ⁻⁶ %	2,1 %

▪ **Cas particulier d'une configuration avec une disposition de fermeture de performance moindre (identifiée « sans scellement MA-VL » dans les figures)**

La Figure 2.3-9 et le Tableau 2.3-3 montrent une très faible différence entre les débits molaires de l'iode 129 issus du quartier MA-VL avec une disposition de fermeture moins performante pour les alvéoles MA-VL.

En effet, avec ce dispositif moins performant, toute chose égale par ailleurs, les maximums de débits molaires en entrée de galeries d'entrée et de retour d'air MA-VL sont augmentés d'environ 20%, mais

¹⁰⁶ Avec une distribution très enveloppe de l'inventaire (maximum d'inventaire d'iode 129 et de chlore 36 près de l'entrée du quartier),

cette différence s'atténue en entrée de zone principale, pour ne plus être notable en sortie des liaisons surface/fond. Les dates d'occurrence de ces maxima ne sont pas modifiées de manière significative.

Ces résultats sont en lien avec l'efficacité des scellements des ouvrages de liaison surface-fond qui contribuent à s'opposer à la circulation de l'eau et ainsi assurer un transfert diffusif dominant dans le stockage qui permet pour la part de radionucléides qui empreinte la voie ouvrages de diffuser dans le Callovo-Oxfordien.

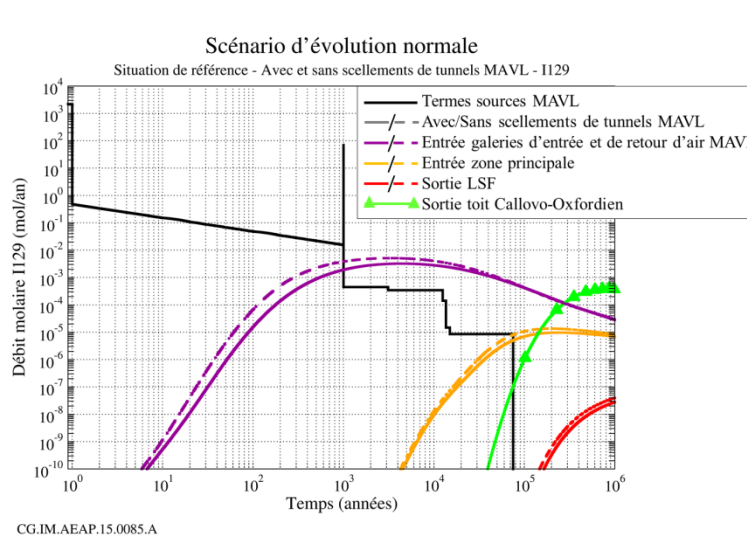


Figure 2.3-9 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence quartier MA-VL, alvéoles MA-VL avec scellement ou avec une disposition de fermeture de performance moindre qu'un scellement (« sans scellement »). Historique des débits molaires en iode 129 entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), dans les galeries de liaison, dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Tableau 2.3-3 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence, quartier MA-VL, alvéoles MA-VL avec et « sans scellement » : bilan de la quantité d'iode 129 (cumul sur un million d'années, normé par l'inventaire initial de la zone MA-VL) entrant dans les galeries de liaison et dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien

	Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial de la zone MA-VL)			
	Entrée dans les galeries de liaison / de retour d'air	Entrée en zone principale	Sortant des LSF	Sortie au toit du Callovo-Oxfordien
MA-VL avec scellement	8,6 %	0,3 %	< 10 ⁻³ %	10 %
Alvéoles MA-VL sans scellement	10 %	0,4 %	< 10 ⁻³ %	10 %

Des formations encaissantes aux exutoires

La Figure 2.3-10 représente l'iso-concentration en iode 129 (10⁻¹¹ mol.L⁻¹) dans le milieu géologique à un million d'années.

Les radionucléides qui parviennent au toit du Callovo-Oxfordien atteignent des horizons poreux de l'Oxfordien carbonaté caractérisés par un gradient hydraulique moyen de 0,4 % et une vitesse de pore de l'ordre de 10 km par 100 000 ans, et une direction vers le Nord-Ouest, avant d'atteindre la base du Kimméridgien (trajectoires vertes). Les radionucléides migrent ensuite dans cette formation marneuse

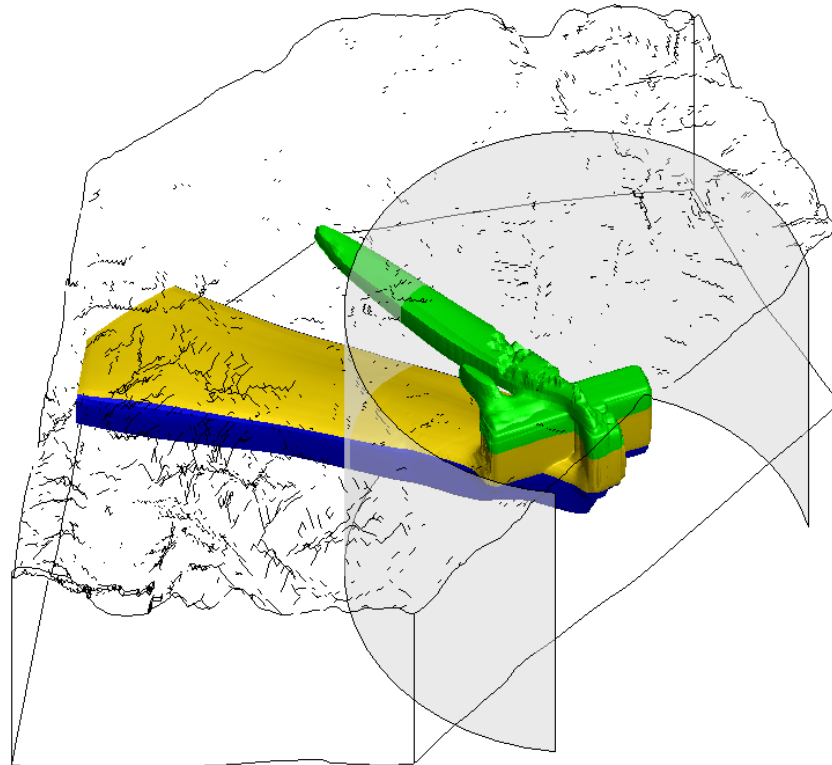
par diffusion avant de se disperser dans l'aquifère du Barrois. Les débits molaires dans l'Oxfordien présentés ci-après sont calculés à 9 km de l'emprise du stockage.

Les radionucléides qui parviennent au mur du Callovo-Oxfordien atteignent les calcaires du Dogger où l'écoulement est orienté vers le Nord-Ouest, avec une vitesse moyenne d'environ 5 km par 100 000 ans, avant d'atteindre la zone de fracturation diffuse (trajectoires bleues). Les débits molaires dans le Dogger présentés ci-après sont calculés au niveau de la zone de fracturation diffuse située à 9 km de l'emprise du stockage.

Trajectoires
Oxfordien

Diffusion
Callovo-oxfordien

Trajectoires
Dogger



CG.IM.AEAP.15.0087.A

9 km

Figure 2.3-10 : Cartographie de l'iso-concentration en iode 129 à 10^{11} mol.L⁻¹ dans le milieu géologique à 1 million d'années. Trajectoires bleues : du mur du Callovo-Oxfordien à la zone de fracturation diffuse ; trajectoires vertes : du stockage au toit de l'Oxfordien calcaire ; trajectoires jaunes : Callovo-Oxfordien (à l'équilibre avec le Dogger)

La Figure 2.3-11 présente les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 en sortie des principales formations encaissantes.

Le Tableau 2.3-4 compare les débits molaires dans les formations encaissantes à l'inventaire initial total. Il ressort de ces résultats :

- pour la voie de transfert par l'Oxfordien :
 - ✓ une très faible proportion de l'inventaire initial en iode 129 atteint les limites supérieures de l'Oxfordien (de l'ordre 0.006 %). Le transfert dans l'Oxfordien permet de bénéficier d'une atténuation de 3 ordres de grandeur des débits molaires de l'iode 129, avec un retard de l'occurrence du maximum de débit molaire de 150 000 ans par rapport à la date d'occurrence du débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien ;
 - ✓ le transfert dans le Kimméridgien permet une atténuation supplémentaire d'un facteur 7 et la quantité totale d'iode 129 atteignant le Barrois ne représente que 0.0004 % de l'inventaire initial ;

- ✓ les observations sont similaires pour le chlore 36. Le transfert dans l'Oxfordien conduit à ce que seulement 0.003 % de l'inventaire initial atteignent les limites supérieures de l'Oxfordien et 0,0002 % atteignent le Barrois ;
- ✓ tout comme l'iode et le chlore 36, le sélénium 79 subit une atténuation d'environ 5 ordres de grandeur entre le toit du Callovo-oxfordien et le toit du Kimméridgien.
- pour la voie de transfert par le Dogger :
 - ✓ les écoulements dans le Dogger vers la zone de fracturation diffuse, sont plus rapides que dans l'Oxfordien ;
 - ✓ la quasi-totalité des radionucléides mobiles qui arrivent au mur du Callovo-Oxfordien migre vers la zone de fracturation diffuse (85 % de l'iode 129, 80% du chlore 36 et 70% du sélénium 79) en raison des échanges plus limités entre le Dogger et le Callovo-Oxfordien¹⁰⁷.

¹⁰⁷ Du fait des vitesses de migration relativement élevées dans le Dogger.

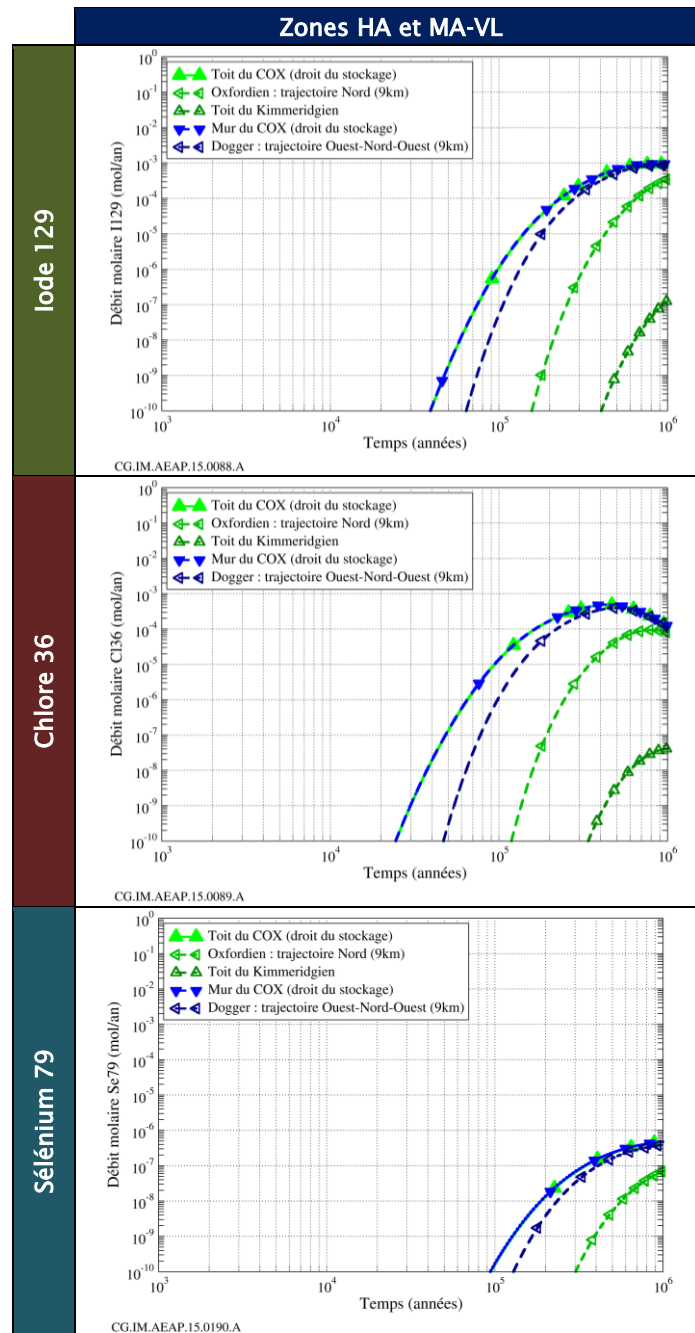


Figure 2.3-11 :

Scénario d'évolution normale - Situation de référence : Historique des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, dans l'Oxfordien (à 9 km en aval des écoulements), au toit du Kimméridgien et dans le Dogger (au niveau de la zone de fracturation diffuse)

Tableau 2.3-4 : Scénario d'évolution normale – Situation de référence – Bilan des débits molaire en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, du Callovo-Oxfordien aux exutoires. Valeurs normées par rapport à l'inventaire initial total

		Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
		% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁶ mol. an ⁻¹)	Date du maximum (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles HA/MA-VL		5 000 moles			5 800 moles			40 000 moles		
Dont HA		54 %			68 %			97%		
Dont MA-VL		46 %			32 %			3%		
Vers l'exutoire au Barrois	Au toit du Callovo-Oxfordien	11 %	930	840	4,6 %	490	440	6.10 ⁻⁴ %	0,47	> 1000
	Toit de l'oxfordien	6.10 ⁻³ %	0,93	> 1000	3.10 ⁻³ %	0,31	700	1.10 ⁻⁷ %	2.10 ⁻⁴	> 1000
	Toit du Kimméridgien	4.10 ⁻⁴ %	0,13	> 1000	2.10 ⁻⁴ %	0,04	> 1000	7.10 ⁻⁹ %	2.10 ⁻⁵	> 1000
	Oxfordien (à 9km en aval) (%)	1,8 %	360	> 1000	0,8 %	94	800	4.10 ⁻⁵ %	0,07	> 1000
Vers l'exutoire au Dogger	Au mur du Callovo-Oxfordien	11 %	950	840	4,6 %	49	440	6.10 ⁻⁴ %	0,48	> 1000
	Dogger zone de fracturation diffuse) (%)	9,3 %	860	890	3,7 %	400	490	4.10 ⁻⁴ %	0,39	> 1000

Le transfert dans la biosphère

La définition du modèle de biosphère permet de calculer les doses reçues par le groupe de référence hypothétique retenu pour chacun des exutoires.

Les résultats sont exposés à la Figure 2.3-12 et au Tableau 2.3-5 :

- l'exutoire « pompage dans le Barrois » : que ce soit en biosphère type tempérée ou en biosphère type chaude, les impacts radiologiques sont très faibles, avec des maxima inférieurs à 10⁻⁶ mSv/an. Le cumul de dose est atteint après un million d'années ;
- l'exutoire « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » : En biosphère tempérée et en biosphère chaude, les doses, pilotées par l'iode 129 et le chlore 36, restent inférieures à 0,001 milli-Sievert par an. Le cumul de dose maximal est atteint à environ 800 000 ans.

L'impact à l'exutoire « pompage dans le Barrois » est sensiblement inférieur à celui à l'exutoire « pompage dans le Dogger »¹⁰⁸. Cela reflète une atténuation supplémentaire du fait des caractéristiques naturelles des formations encaissantes supérieures, notamment de l'Oxfordien.

¹⁰⁸ Bien qu'à ces très faibles niveaux la comparaison soit peu pertinente.

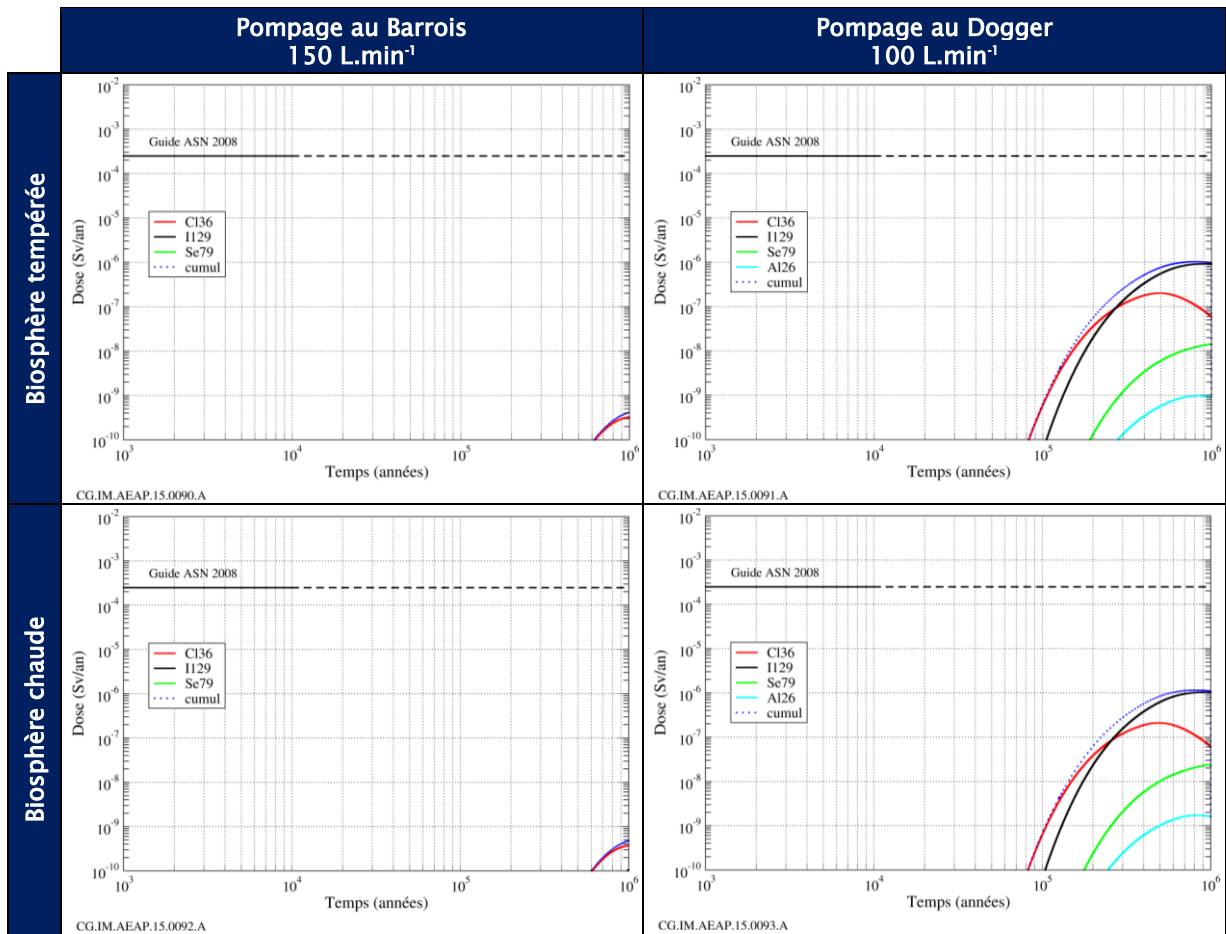


Figure 2.3-12 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence : historiques des doses aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude

Tableau 2.3-5 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude

RN	Exutoire Pompage au Barrois 150 L.min ⁻¹				Exutoire Pompage au Dogger 100 L.min ⁻¹			
	Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)
³⁶ Cl	3,2.10 ⁻⁰⁷	≥1000	3,7.10 ⁻⁰⁷	≥1000	2,0.10 ⁻⁰⁴	490	2,1.10 ⁻⁰⁴	490
¹²⁹ I	9,4.10 ⁻⁰⁸	≥1000	1,0.10 ⁻⁰⁷	≥1000	9,2.10 ⁻⁰⁴	890	1,0.10 ⁻⁰³	890
⁷⁹ Se	9,0.10 ⁻¹⁰	≥1000	1,9.10 ⁻¹⁰	≥1000	1,4.10 ⁻⁰⁵	≥1000	2,4.10 ⁻⁰⁵	≥1000
²⁶ Al	-	-	-	-	9,7.10 ⁻⁰⁷	830	1,7.10 ⁻⁰⁶	830
Cumul¹⁰⁹	4,2.10 ⁻⁰⁷	≥1000	4,8.10 ⁻⁰⁷	≥1000	1,0.10 ⁻⁰³	800	1,1.10 ⁻⁰³	810

2.3.3.2 Situation enveloppe

Pour mémoire, la situation correspondant aux exigences considère deux cas :

- cas de l'installation souterraine représentée avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien, dénommé « stockage haut » par la suite. Cette situation est modélisée avec un gradient hydraulique de 0,1 m.m⁻¹ sur toute l'emprise du stockage, favorable aux transferts advectifs ascendants. Les voies de transfert par le Callovo-Oxfordien et par les ouvrages sont représentées ;
- cas de l'installation souterraine représentée avec une garde de 50 mètres en partie inférieure du Callovo-Oxfordien, dénommé « stockage bas » par la suite. Cette situation est modélisée avec un gradient hydraulique de -0,05 m.m⁻¹ sur toute l'étendue du stockage, favorable aux transferts advectifs descendants, de sorte à obtenir une évaluation majorante des voies de transfert par le Dogger. Seule la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est considérée.

Des colis au toit et au mur du Callovo-Oxfordien

▪ Analyse des débits molaires en sortie du Callovo-Oxfordien pour l'iode 129 et le chlore 36

Le Tableau 2.3-6 et le Tableau 2.3-7 présentent les principaux indicateurs relatifs aux débits molaires de ces radionucléides. La Figure 2.3-13 présente l'évolution des débits molaires en iode 129 et en chlore 36 au toit et au mur du Callovo-Oxfordien pour les deux cas quantifiés.

Les résultats montrent que les deux cas de calculs sont symétriques l'un de l'autre. Il en ressort les observations suivantes :

- après un million d'années, 80% de l'iode 129 initiale et 36% du chlore 36 initial ont atteint les limites du Callovo-Oxfordien. Le reste est encore présent dans le Callovo-Oxfordien ou a disparu par décroissance radioactive. Cet écart est dû à la période du chlore 36, qui permet de bénéficier d'une décroissance radioactive supérieure à celle de l'iode 129, et à sa rétention dans le béton de revêtement-soutènement ;

¹⁰⁹ Les valeurs présentées à la ligne « cumul » sont les doses maximales et les dates d'occurrence qui correspondent au cumul des doses de chaque radionucléide. Ces valeurs sont calculées d'après l'historique de la somme des doses liées à chaque radionucléide, tracée en pointillés bleu sur les figures 2.3-12 et 2.3-18. Les doses maximales et les dates d'occurrence ne coïncident pas nécessairement à celles des principaux radionucléides (iode 129, chlore 36 et sélénium 79).

- les comportements de l'iode 129 et du chlore 36 présentent de nombreuses similitudes. Par exemple, les débits molaires traversant le Callovo-Oxfordien atteignent leur maximum après environ 100 000 ans. Cette similitude s'explique par le fait qu'en situation enveloppe, les paramètres de transfert de ces radionucléides dans le Callovo-Oxfordien sont similaires, notamment par l'absence de rétention du chlore 36 dans le revêtement des alvéoles MA-VL ;
- le débit molaire maximum de l'iode par la voie ouvrages est environ 500 fois inférieur à celui de l'iode transitant par le Callovo-Oxfordien. Ce rapport atteint 2000 pour le chlore 36. En effet, la rétention du chlore dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL contribue à réduire son débit molaire par la voie ouvrages ;
- lorsque le stockage est représenté avec une garde supérieure de 50 mètres et un gradient de charge favorable aux transferts ascendants (« stockage haut »), les débits d'iode 129 et de chlore 36 au mur du Callovo-Oxfordien sont moins importants (respectivement 2.10^{-3} mol/an et 1.10^{-3} mol/an) et atteignent leur maximum plus tard (après environ 250 000 ans). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus en situation de référence et ne sont pas pris en compte par la suite ;
- les conditions de transfert sont à diffusion dominante au niveau des gardes inférieure et supérieure du Callovo-Oxfordien. Plus précisément, le rapport entre les flux par convection et par diffusion, calculé à l'échelle de la garde supérieure ou inférieure du Callovo-Oxfordien, est inférieur à 0,1. L'écart entre les débits molaires au toit et au mur de la formation est lié à la différence d'épaisseur entre la garde supérieure et la garde inférieure du Callovo-Oxfordien, respectivement 50 mètres et près de 75 mètres ;
- par rapport à la situation de référence, les quantités cumulées sur 1 million d'années de radionucléides mobiles qui atteignent des formations encaissantes sont environ 5 fois plus importantes et les débits molaires sont environ 10 fois plus importants. Ces différences sont principalement dues à la différence d'épaisseurs de garde retenues en situation enveloppe et en situation de référence (respectivement 50 mètres et 70 mètres).

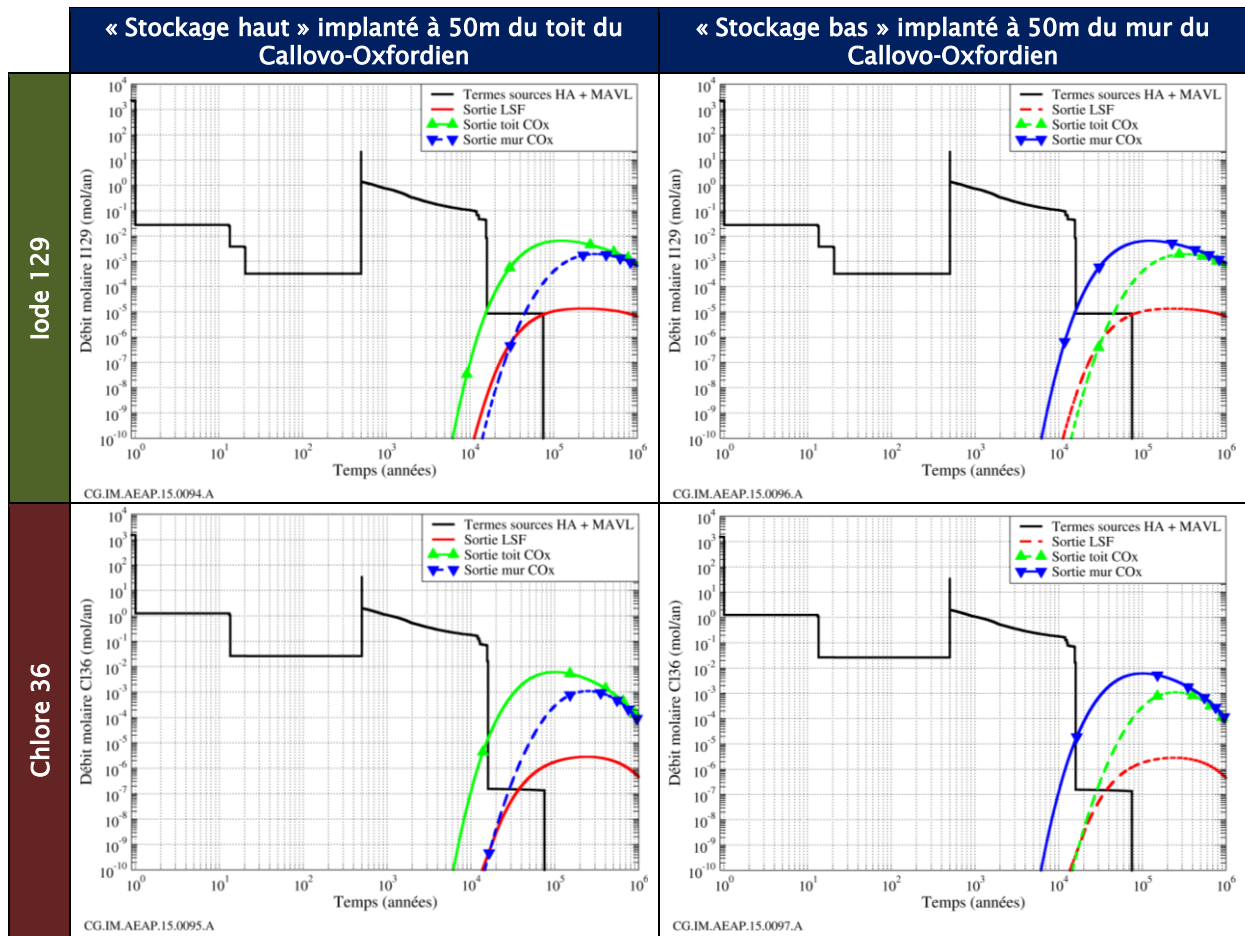


Figure 2.3-13 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - stockage implanté à 50 m du toit (gauche) ou du mur (droite) du Callovo-Oxfordien : Historiques de débits molaires en iode 129 (haut) et chlore 36 (bas) sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Tableau 2.3-6 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage haut ») - Bilan des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux par les voies Callovo-Oxfordien et ouvrages

	Iode 129			Chlore 36		
	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁻⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁻⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles	5 000 moles			5 800 moles		
Dont HA	54 %			68 %		
Dont MA-VL	46 %			32 %		
Au toit du Callovo-Oxfordien	56 %	6 500	120	28 %	6 100	100
Dont HA	33 %	4 400	110	22 %	5 100	95
Dont MA-VL	23 %	2 300	160	6,1 %	1 100	130
Au mur du Callovo-Oxfordien	24 %	1 900	320	8,2 %	1 100	230
Dont HA	12 %	980	340	5,6 %	740	320
Dont MA-VL	12 %	970	290	2,6 %	370	210
Par la voie ouvrages	0,4 %	13	230	0,09%	2,8	240
Dont HA	~10 ⁻³ %	0,04	260	~10 ⁻⁴ %	0,009	220
Dont MA-VL	0,4 %	13	230	0,09 %	2,8	240

Tableau 2.3-7 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage bas ») - Bilan des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux par les voies Callovo-Oxfordien et ouvrages

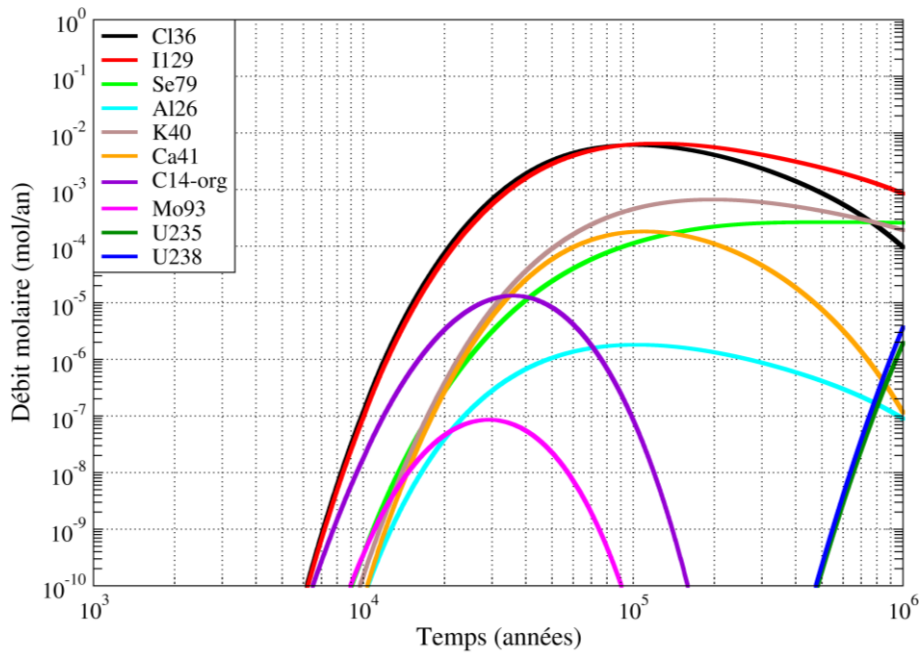
	Iode 129			Chlore 36		
	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁻⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire maximum (10 ⁻⁶ mol/an)	Date du maximum (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles	5 000 moles			5 800 moles		
Dont HA	54 %			68 %		
Dont MA-VL	46 %			32 %		
Au toit du Callovo-Oxfordien	24 %	1 900	320	8,2 %	1 100	230
Dont HA	12 %	980	340	5,6 %	740	320
Dont MA-VL	12 %	970	290	2,6 %	370	210
Au mur du Callovo-Oxfordien	56 %	6 500	120	28 %	6 100	100
Dont HA	33 %	4 400	110	22 %	5 100	95
Dont MA-VL	23 %	2 300	160	6,1 %	1 100	130

▪ **Analyse des débits molaires en sortie du Callovo-Oxfordien pour les autres radionucléides - cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien**

La Figure 2.3-14 trace l'évolution des débits molaires des principaux radionucléides au toit du Callovo-Oxfordien. Ces flux sont supérieurs à ceux au mur du Callovo-Oxfordien, du fait d'une épaisseur de garde supérieure de Callovo-Oxfordien sain plus petite que celle de la garde inférieure (cette dernière correspondant au minimum défini par les exigences applicables à Cigéo). Tous les radionucléides dont le débit molaire excède 1.10^{10} mole au cours de cette période sont représentés. Il s'agit de :

- l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, radionucléides mobiles (solubles et sans rétention) dans le Callovo-Oxfordien. Le débit molaire du sélénium 79 est supérieur à 10^{-4} mol/an après 100 000 ans ;
- l'aluminium 26, mobile à vie longue; son faible inventaire initial conduit à des niveaux de relâchement limités, même en situation « enveloppe ». Son débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien atteint 2.10^{-6} mol/an après 100 000 ans ;
- le calcium 41 et le potassium 40, faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et le Callovo-Oxfordien ; leurs inventaires initiaux élevés conduisent à des débits molaires maximaux totaux supérieurs à 10^{-4} mol/an, entre 100 000 ans et 200 000 ans ;
- le carbone 14 et le molybdène 93 qui, malgré leur faible période, ont un inventaire initial élevé conduisant à des débits molaires supérieurs à 10^{-7} mol/an. L'impact du carbone 14 est à relativiser compte tenu des hypothèses très enveloppes retenues¹¹⁰. L'impact du molybdène 93 est à relativiser puisqu'après 50. 000 ans seulement 10^{-3} % de son inventaire initial a atteint les limites du Callovo-Oxfordien et son débit molaire est très inférieur aux autres radionucléides compte tenu de sa période de demi-vie ;
- l'uranium 235 et l'uranium 238 (en prenant en compte des coefficients de partage conservatifs dans le Callovo-Oxfordien) ont un inventaire et une période qui conduit à des débits molaires supérieurs à 10^{-10} mol/an avec des dates d'occurrence très tardives (débit molaires maximaux au-delà de 3 à 4 millions d'années en sortie du Callovo-Oxfordien). A un million d'années, seulement 10^{-6} % de l'inventaire initial en uranium a atteint les limites du Callovo-Oxfordien.

¹¹⁰ La représentation du comportement du carbone 14 retenue à ce stade est très enveloppe : 100 % de son inventaire est considéré sous forme organique, sans sorption et soluble dans les composants cimentaires et dans le Callovo-Oxfordiens, avec un coefficient de diffusion majorant.



CG.IM.AEAP.15.0098.A

Figure 2.3-14 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe : historique des débits molaires au toit du Callovo-Oxfordien (« Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien)

▪ **Analyse du transfert de l'iode 129 et du chlore 36 issus des zones HA et MA-VL (cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure de la formation)**

La Figure 2.3-15 donne l'évolution des débits molaires en iode 129 et chlore 36 relâchés par les colis de déchets HA et MA-VL et migrant par le Callovo-Oxfordien et par la voie ouvrages. Les débits molaires sont déterminés à différents endroits au long des ouvrages dans les zones HA et MA-VL (galeries d'accès (zone HA) et galeries de liaison), dans la zone principale et aux sorties des ouvrages de liaison surface-fond.

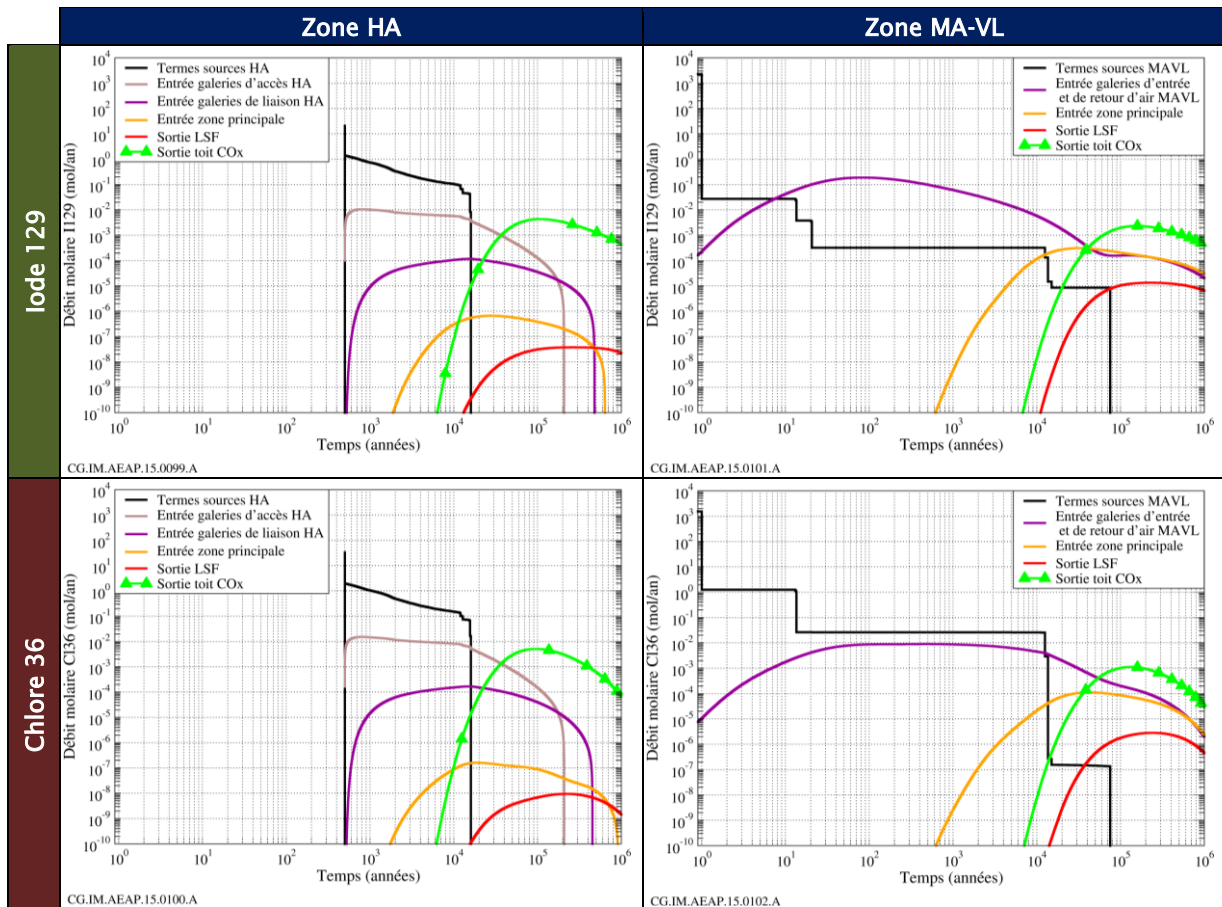


Figure 2.3-15 : Scénario d'évolution normale - Situation « enveloppe » - « stockage haut » implanté avec une garde supérieure de 50 m, quartiers HA (à gauche) et MA-VL (à droite) : historiques de débits molaires en iode 129 et chlore 36 entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), dans les galeries de liaison et dans la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien.

Les graphes de la Figure 2.3-15 et le Tableau 2.3-8 mettent en évidence les points suivants :

- en situation « enveloppe », le relâchement de l'iode 129 et du chlore 36 intervient plus tôt qu'en situation de référence :
 - ✓ entre 500 et 20 000 ans dans la zone HA ;
 - ✓ avant 80 000 ans dans la zone MA-VL, avec une fraction labile plus importante qu'en situation de référence ;
- les débits molaires des radionucléides transitant par la voie ouvrages sont plus importants pour la zone MA-VL que pour la zone HA. Cet écart est dû à la répartition de l'inventaire MA-VL, disposé en entrée de quartier (environ 50% de l'inventaire total en iode 129 et en chlore 36 est positionné dans les 5 premiers alvéoles MA-VL), et à l'orientation des écoulements dans l'installation souterraine, plus favorable aux transferts depuis le quartier MA-VL vers la zone principale ;
- dans la zone HA, les débits molaires en iode 129 et en chlore 36 par la voie ouvrages diminuent brutalement, après environ 200 000 ans en entrée de galerie d'accès, 400 000 ans en entrée de galerie de liaison et 600 000 ans en entrée de zone principale. Cette évolution est due aux écoulements lents orientés vers la zone HA. Aux dates identifiées ci-dessus, les flux convectifs vers la zone HA contrebalancent les flux diffusifs.

Le Tableau 2.3-8 donne le bilan des débits molaires en iode 129 et en chlore 36 cumulés sur 1 million d'années, en différents endroits au long de la voie ouvrages. Ces bilans, normés par rapport à l'inventaire initial des zones HA et MA-VL, conduisent aux observations suivantes :

- dans la zone HA, moins de 6 % de l'inventaire initial en iode 129 et en chlore 36 atteignent les galeries d'accès, le reste sortant des alvéoles radialement, par le Callovo-Oxfordien. Cette fraction est faible grâce à la longueur des alvéoles HA et au régime hydraulique faible. Le transfert lent au long des galeries d'accès permet également aux radionucléides de traverser le revêtement et de diffuser dans les argilites. Ainsi, seulement 0,4 % de l'inventaire initial en iode 129 et 0,3% de celui en chlore 36 atteignent les galeries de liaison et le débit molaire maximal est atténué de deux ordres de grandeur. Seulement 0,01 % de l'inventaire initial en iode 129 et 0,001 % de celui de chlore 36 atteignent la zone principale, avec une atténuation supplémentaire de deux ordres de grandeur. In fine, une très faible fraction des inventaires en iode 129 (de l'ordre de 0,003 %) et du chlore 36 (0,0001 %) sortent des liaisons surface-fond, avec une atténuation d'un ordre de grandeur supplémentaire. Le débit molaire maximal est alors 5 à 6 ordres de grandeur inférieur au débit molaire des radionucléides qui traversent le Callovo-Oxfordien ;
- dans la zone MA-VL, 17 % de l'inventaire initial en iode 129 et 9 % de celui en chlore 36 atteignent les galeries de liaison. Ces proportions tombent à 4,2 % et 1,6 % respectivement entrée de la zone principale, avec une atténuation de 2 à 3 ordres de grandeur du débit molaire maximal. La cinétique lente des écoulements dans les galeries d'accès et le transfert vers le Callovo-Oxfordien permettent de limiter à 0,4 et 0,1 % les fractions d'iode 129 et de chlore 36 qui sortent des liaisons surface-fond, avec une atténuation supplémentaire des débits molaires maximum de plus d'un ordre de grandeur. Le débit molaire maximal est alors d'environ 2 à 3 ordres de grandeur inférieur au débit molaire des radionucléides qui migrent par le Callovo-Oxfordien.

Tableau 2.3-8 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« Stockage haut ») : cumul sur un million d'année des quantités d'iode 129 et chlore 36 entrant dans les galeries d'accès, les galeries de liaison et la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien. Pourcentage par rapport à l'inventaire initial des quartiers HA et MA-VL.

% de l'inventaire total initial de la zone HA	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée zone principale	Sortant des LSF	Sortie toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129	5,8 %	0,4 %	<10 ⁻² %	~10 ⁻³ %	61 %
Chlore 36	5,7 %	0,3 %	< 10 ⁻³ %	~ 10 ⁻⁴ %	32 %
% de l'inventaire total initial de la zone MA-VL	Entrée dans les galeries de liaison/accès et retour d'air		Entrée zone principale	Sortant des LSF	Sortie toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129	17 %		4,2 %	0,4 %	49 %
Chlore 36	9,3 %		1,6 %	0,09 %	19 %

▪ **Cas particulier d'une configuration avec un dispositif de fermeture de performance moindre**

Pour les raisons évoquées plus haut, seule la configuration avec un « stockage haut » implanté avec une garde supérieure de 50 m est analysée.

La Figure 2.3-6 et le Tableau 2.3-9 représentent les débits molaires de l'iode 129 provenant de la zone MA-VL et transitant par le Callovo-Oxfordien et par la voie ouvrages cas avec scellement dans alvéole MA-VL ou un dispositif de fermeture de performance moindre¹¹¹).

¹¹¹ Cas identifié comme « sans scellement des alvéoles MA-VL » dans les figures et tableaux.

Avec un dispositif de fermeture de performance moindre, les débits molaires cumulés en l'entrée de la zone principale et en sortie des liaisons surface-fond sont augmentés d'environ 20 %, ce qui est faible par rapport au flux migrant par le Callovo-Oxfordien. Cela est dû à l'efficacité des scellements des ouvrages de liaison surface-fond, qui garantissent une absence de transfert significatif par la voie ouvrages. Les débits molaires aux autres emplacements ne sont pas affectés.

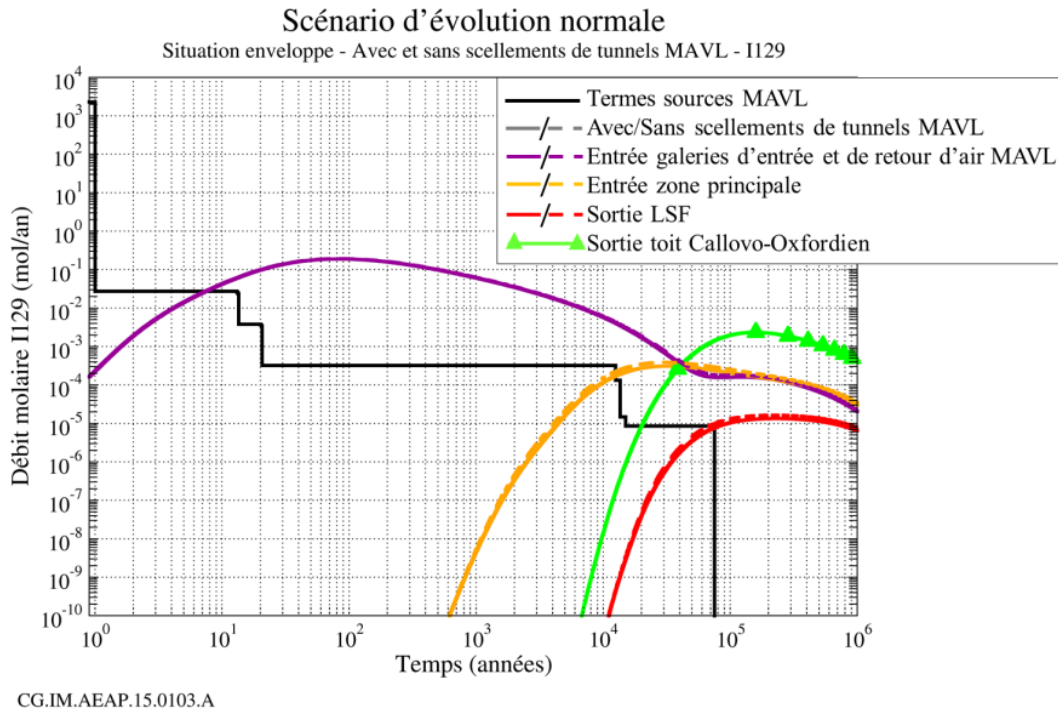


Figure 2.3-16 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage haut »), quartier MA-VL, alvéoles MA-VL avec scellement ou avec dispositif de fermeture de performance moindre : historique des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), les galeries de liaison et la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Tableau 2.3-9 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe (« stockage haut »), quartier MA-VL, alvéole MA-VL avec scellement ou avec dispositif de fermeture de performance moindre : bilan de la quantité d'iode 129 (cumul sur un million d'années, normé par l'inventaire initial du quartier MA-VL) entrant dans les galeries de liaison et dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien

	Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial du quartier MA-VL)			
	Entrée dans les galeries de liaison / de retour d'air	Entrée en zone principale	Sortant des LSF	Sortie au toit du Callovo-Oxfordien
Alvéoles MA-VL avec scellement	17 %	4,2 %	0,4 %	49 %
Alvéoles MA-VL avec dispositif de fermeture de performance moindre	18 %	5,1 %	0,5 %	49 %

Des formations encaissantes aux exutoires

La Figure 2.3-17 présente les débits molaires de l'iode 129 et du chlore 36 de la sortie au toit du Callovo-Oxfordien à l'exutoire du Barrois et de la sortie au mur du Callovo-Oxfordien à l'exutoire du Dogger, dans la zone de fracturation diffuse. Le Tableau 2.3-10 et le Tableau 2.3-11 permettent de comparer les débits molaires dans les formations encaissantes à l'inventaire initial total.

Les écoulements lents dans l'Oxfordien calcaire permettent l'atténuation et la rétrodiffusion des radionucléides vers le Callovo-Oxfordien. Le transfert dans l'Oxfordien permet ainsi l'atténuation des débits molaires maximum au toit du Callovo-Oxfordien d'un facteur 20 pour l'iode 129 et le chlore 36, avec une date d'occurrence du débit molaire maximum après environ 250 000 ans. Les proportions de l'inventaire initial en iode 129 et en chlore 36 qui atteignent les calcaires du Barrois sont de 3 % pour l'iode 129 et 1 % pour le chlore 36. Contrairement à la situation de référence, l'atténuation obtenue lors la traversée du Kimméridgien est très limitée du fait des paramètres de transfert conservatifs dans l'Oxfordien et le Kimméridgien.

Les écoulements dans le Dogger vers la zone de fracturation diffuse sont plus rapides que dans l'Oxfordien calcaire. Ainsi, 80 % de l'iode 129 et 75 % du chlore 36 atteignant le mur du Callovo-Oxfordien migrent vers la zone de fracturation diffuse, avec une atténuation très faible et un retard de l'ordre de 30 000 ans.

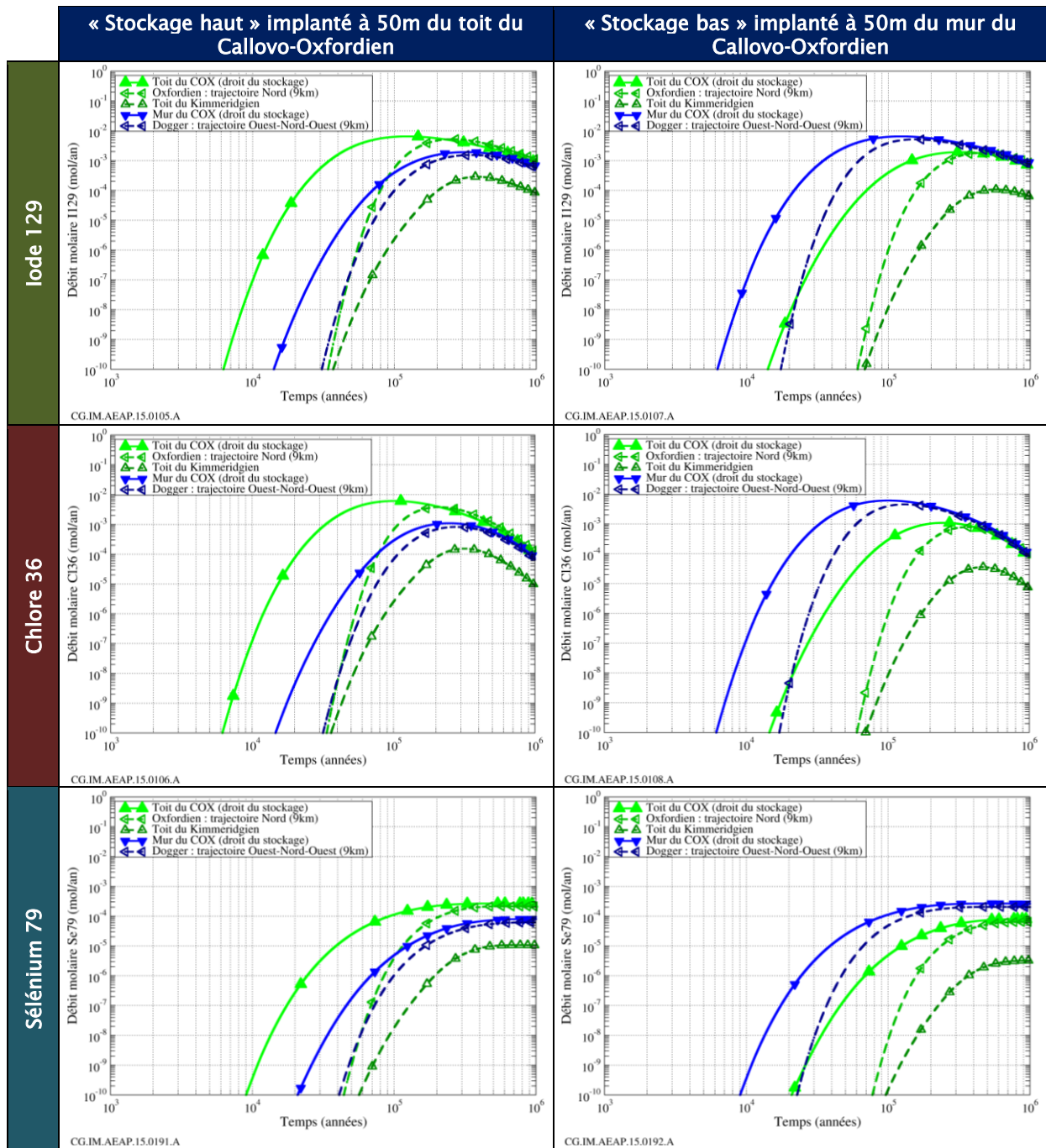


Figure 2.3-17 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe, historique des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le milieu géologique au toit (à gauche) et au mur (à droite) du Callovo-Oxfordien, dans l'Oxfordien (à 9 km en aval de l'emprise du stockage), au toit du Kimmeridgien et dans le Dogger (au niveau de la zone de fracturation diffuse)

Tableau 2.3-10 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien. Bilan des débits molaires en iode 129 et chlore 36 cumulés sur un million d'années, du toit du Callovo-Oxfordien à l'exutoire du Barrois. Valeurs normées par rapport à l'inventaire initial total.

	Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
	% quantité initiale	Débit molaire max. (10 ⁶ mol/an)	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. (10 ⁶ mol/an)	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. (10 ⁶ mol/an)	Date du max. (milliers d'années)
Au toit du Callovo-Oxfordien	56 %	6 500	120	28 %	6 100	100	0,6 %	270	540
<i>Toit de l'Oxfordien</i>	3,2 %	350	270	8,2 %	240	230	0,02 %	10	530
<i>Toit du Kimméridgien</i>	3,0 %	290	380	5,6 %	150	320	0,02 %	10	730
<i>Oxfordien (à 9km en aval)</i>	52 %	5 300	260	2,6 %	3 800	210	0,4%	220	660

Tableau 2.3-11 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe - « Stockage bas » implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien. Bilan des débits molaires en iode 129 et chlore 36 cumulés sur un million d'années, du mur du Callovo-Oxfordien à l'exutoire du Dogger. Valeurs normées par rapport à l'inventaire initial total.

	Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
	% quantité initiale	Débit molaire max. (10 ⁶ mol/an)	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. (10 ⁶ mol/an)	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. (10 ⁶ mol/an)	Date du max. (milliers d'années)
Au mur du Callovo-Oxfordien	56 %	6 500	120	28 %	6 100	100	0,6%	270	540
<i>Dogger zone de fracturation diffuse</i>	44 %	5 200	150	21 %	4 600	130	0,4%	210	610

Le transfert dans la biosphère

Les résultats exposés à la Figure 2.3-18 et au Tableau 2.3-12 présentent les doses reçues par le groupe de référence hypothétique retenu pour chacun des exutoires et pour chacune des biosphères types tempérée ou chaude.

Il ressort des résultats les éléments majeurs suivants :

- qu'à l'exutoire « pompage dans le Barrois », les impacts radiologiques sont faibles, de l'ordre de 0,002 mSv/an (soit très inférieur à 0,25 mSv/an, valeur fixée dans le guide de sûreté publié en 2008 par l'ASN (1)). La date d'occurrence du maximum de dose (cumul) se situe autour de 340 000 ans que ce soit en biosphère tempérée ou biosphère chaude. Le principal contributeur à cette dose est le chlore 36 jusqu'à 600 000 ans, puis le sélénium 79 ;
- qu'à l'exutoire « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » les doses sont également faibles, de l'ordre de $15 \cdot 10^{-3}$ mSv par an avec un maximum de dose atteint autour de 200 000 ou 250 000 ans respectivement pour la biosphère type tempérée et la biosphère type chaude. L'iode 129 est le principal contributeur jusqu'à 200 000 ans, puis c'est le sélénium 79. Contrairement à la dose à l'exutoire Barrois, le chlore 36 n'est pas le contributeur principal du fait du modèle de dilution isotopique retenu, dilution plus importante dans le Dogger du fait de la salinité de ses eaux porales (i.e. présence de chlore stable, chlore 35 et chlore 37).

La différence entre la situation de référence et la situation enveloppe, observée pour les doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois », est limitée, d'un facteur 7 pour l'iode 129 et 1,2 pour le chlore 36. Cette différence reflète la prise en compte d'un transport diffusif dans les niveaux marneux des formations encaissantes supérieures en situation de référence. Ces résultats montrent que les formations encaissantes supérieures peuvent apporter par leurs caractéristiques naturelles une atténuation supplémentaire au transfert des radionucléides vers l'exutoire du Barrois.

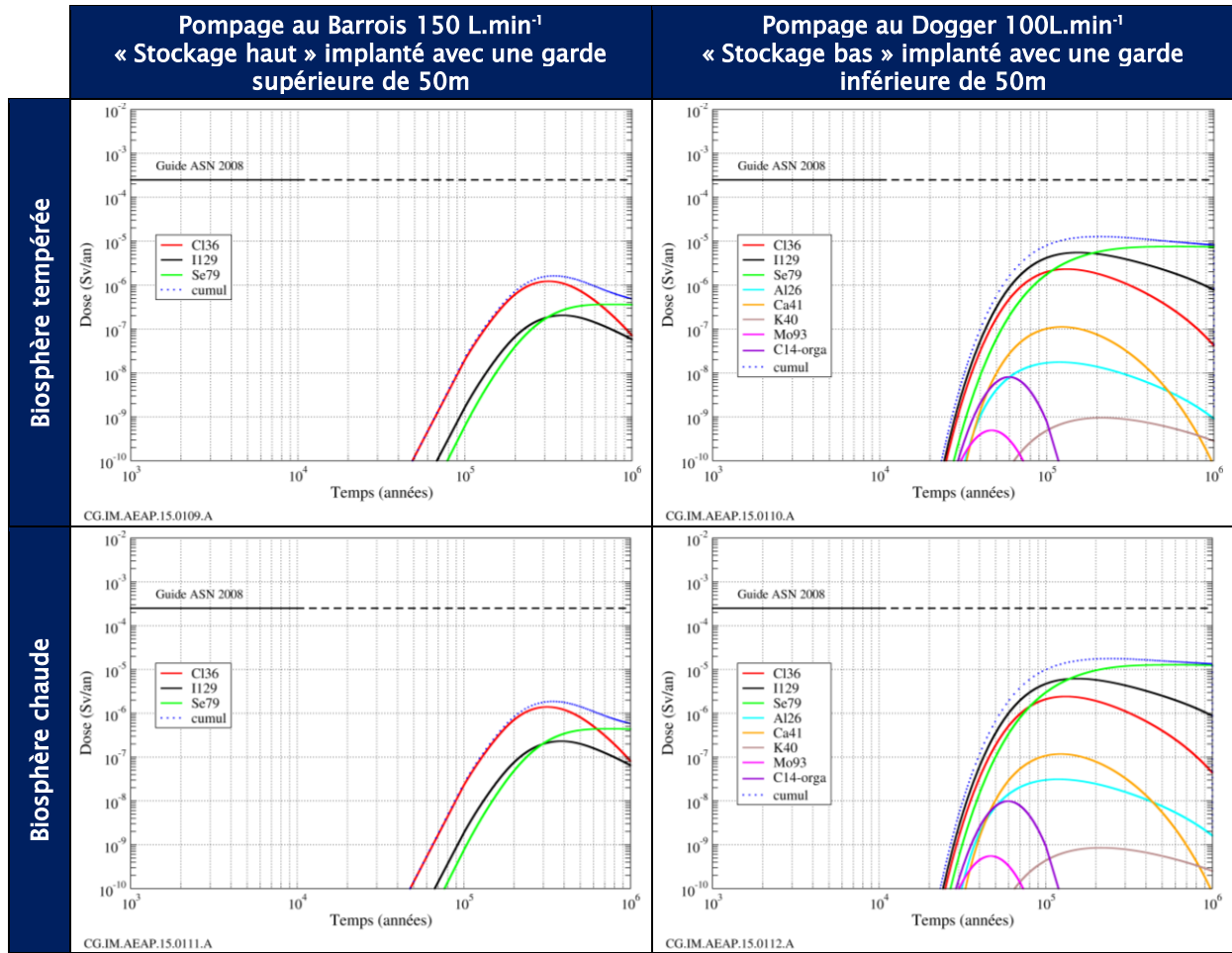


Figure 2.3-18 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe : historiques des doses aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude

Tableau 2.3-12 : Scénario d'évolution normale - Situation enveloppe : doses maximales et occurrence des doses maximales aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude

RN	Pompage au Barrois Stockage implanté avec une garde supérieure de 50m				Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) 100 L.min ⁻¹ Stockage implanté avec une garde inférieure de 50m			
	Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)
³⁶ Cl	1,2.10 ⁻⁰³	320	1,4.10 ⁻⁰³	320	2,3.10 ⁻⁰³	130	2,4.10 ⁻⁰³	130
¹²⁹ I	2,1.10 ⁻⁰⁴	380	2,3.10 ⁻⁰⁴	380	5,5.10 ⁻⁰³	150	6,2.10 ⁻⁰³	150
⁷⁹ Se	3,7.10 ⁻⁰⁴	710	4,4.10 ⁻⁰⁴	730	7,6.10 ⁻⁰³	610	1,3.10 ⁻⁰²	610
²⁶ Al					1,8.10 ⁻⁰⁵	120	3,1.10 ⁻⁰⁵	120
⁴¹ Ca					1,1.10 ⁻⁰⁴	120	1,2.10 ⁻⁰⁴	120
⁴⁰ K					9,6.10 ⁻⁰⁷	210	8,5.10 ⁻⁰⁷	210
⁹³ Mo					4,9.10 ⁻⁰⁷	47	5,5.10 ⁻⁰⁷	47
¹⁴ C-organique					8,1.10 ⁻⁰⁶	59	1,0.10 ⁻⁰⁵	59
Cumul	1,6.10 ⁻⁰³	340	1,9.10 ⁻⁰³	340	1,3.10 ⁻⁰²	210	1,8.10 ⁻⁰²	250

2.4 Enseignements du SEN

L'analyse globale des résultats présentés ci-avant conduit à dégager divers enseignements relatifs aux deux situations traitées (référence et enveloppe), en termes de fonctions de sûreté après-fermeture et d'impacts radiologiques.

2.4.1 Analyse des choix structurants du SEN

Les résultats du traitement des deux situations de référence et « enveloppe » montrent bien que les fonctions de sûreté sont assurées en situation « enveloppe » (correspondant aux valeurs spécifiées ou à des choix conventionnels). La prise en compte dans la situation de référence des caractéristiques phénoménologiques du Callovo-Oxfordien et de son environnement où est implanté Cigéo permettent d'identifier un certain nombre de marges :

- l'épaisseur de Callovo-Oxfordien qui est en situation de référence supérieure à la valeur minimale spécifiée dans les exigences (i.e. 50 mètres) apporte une atténuation supplémentaire ;
- les paramètres de rétention et de transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien. En tenant compte d'un débit molaire qui excède 10^{-10} mol/an, les valeurs phénoménologiques de paramètres prises en situation de référence apportent une atténuation supplémentaire aux anions mobiles (par diffusion) et à l'aluminium 26, le calcium 41 et le potassium 40, les autres radionucléides n'atteignant pas 10^{-10} mol/an ;
- la différence de charge hydraulique entre les encaissants calée en situation de référence sur les résultats de la modélisation hydrogéologique conduit à des valeurs moindres qu'en situation « enveloppe » où un choix conventionnel a été fait de retenir la valeur maximale. Les transferts restent néanmoins à dominante diffusive dans le Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages remblayés pour les deux situations ;
- les formations encaissantes n'ont pas de fonction de sûreté, mais la prise en compte de leurs caractéristiques naturelles en termes de transfert diffusif dans les niveaux marneux vers les exutoires offre une atténuation supplémentaire.

2.4.2 Analyse des fonctions de sûreté après-fermeture

2.4.2.1 La fonction « s'opposer à la circulation d'eau »

Les conditions de transfert des radionucléides sont diffusives dans tous les ouvrages du stockage, y compris dans les alvéoles MA-VL, où la vitesse d'écoulement (vitesse de pores) est de l'ordre de 0,25 mm par an (en situation de référence).

Ce transfert diffusif dominant illustre le bon fonctionnement du stockage au regard de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » du fait :

- de l'efficacité des scellements, en particulier ceux des ouvrages de liaison surface/fond, et des propriétés hydrauliques favorables du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité et faible gradient de charge vertical). Les écoulements dans le stockage sont très limités aussi bien dans les alvéoles de stockage, que dans quartiers HA et MA-VL puis dans la zone centrale qui reçoit pourtant la contribution de l'ensemble des quartiers.
- des dispositions de conception de l'architecture d'ensemble (puits regroupés, quartiers borgnes).

La présence d'ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL moins performants n'a pas d'effet significatif sur ces indicateurs.

2.4.2.2 La fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »

La prise en compte de lentes cinétiques de relâchement de certains colis HA (modèle « $V_0 \rightarrow V_R$ ») ou MA-VL (CSD-C) a une influence limitée sur les débits molaires maxima au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, du fait de temps de transfert dans les gardes supérieures et inférieures du Callovo-Oxfordien très grands en regard des durées de relâchement.

Les phénomènes de sorption dans les composants cimentaires des alvéoles MA-VL ont une contribution limitée au temps de transfert total jusqu'au toit et au mur du Callovo-Oxfordien car les performances du Callovo-Oxfordien masquent celles des composants ouvragés. En situation de référence, pour le chlore 36, radionucléide mobile et non sorbé dans le Callovo-Oxfordien, cette contribution est significative dans la mesure où elle retarde d'environ 100 000 ans l'occurrence du débit molaire maximal, pour un temps total de transfert d'environ 800 000 ans.

2.4.2.3 La fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »

Pour la situation de référence

- la majeure partie des radionucléides reste confinée dans le Callovo-Oxfordien à 1 million d'années. Seuls les radionucléides mobiles à vie longue (iode 129, chlore 36, sélénium 79, aluminium 26), le potassium 40 et le calcium 41 (cf. Figure 2.3-6) atteignent des débits molaires supérieurs à 10^{-10} moles par an en sortie du Callovo-Oxfordien ;
- les temps caractéristiques du transfert par diffusion dans le Callovo-Oxfordien, sont de l'ordre de 450 000 ans (pour le chlore 36) à plus de 800 000 ans (pour l'iode 129). Ils permettent de bénéficier d'une décroissance radioactive significative ;
- la prise en compte de la rétention de certains radionucléides (chlore 36) dans le revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL contribue à retarder et atténuer leur migration, l'occurrence des débits molaires maximaux du chlore 36 en sortie de Callovo-Oxfordien est retardée d'environ 100 000 ans ;
- seuls les radionucléides mobiles (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) migrent par la voie ouvrages depuis les alvéoles de stockage vers les ouvrages de liaison surface-fond (puits et descenderies). Ce transfert se fait par diffusion dominante de sorte que les débits molaires maximaux en sortie des ouvrages de liaison surface-fond sont très faibles et très inférieurs à ceux de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien¹¹².

Pour la situation enveloppe :

- comme pour la situation de référence, une grande partie des radionucléides reste confinée dans le Callovo-Oxfordien à 1 million d'années ;
- l'iode 129 et le chlore 36 restent les radionucléides principaux en sortie du Callovo-Oxfordien, mais en prenant comme référence une valeur de débit molaire de 10^{-10} mol/an, d'autres radionucléides, comme le carbone 14, le calcium 41 et le molybdène 93, apparaissent ;
- les temps caractéristiques du transfert par diffusion dans le Callovo-Oxfordien, restent élevés, et supérieurs à 100 000 ans pour l'iode 129 et le chlore 36 et plus de 500 000 ans pour le sélénium 79.

La Figure 2.4-1 représente la répartition des voies de transfert pour l'iode 129 dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis le colis jusqu'aux exutoires. Elle illustre en particulier la faible proportion de radionucléides migrant par les ouvrages remblayés et scellés et la faible quantité de radionucléides qui parviennent aux exutoires.

¹¹² Par exemple, le débit molaire maximum de l'iode 129 par la voie de transfert Callovo-Oxfordien est 30 000 fois supérieur à la voie de transfert par les ouvrages.

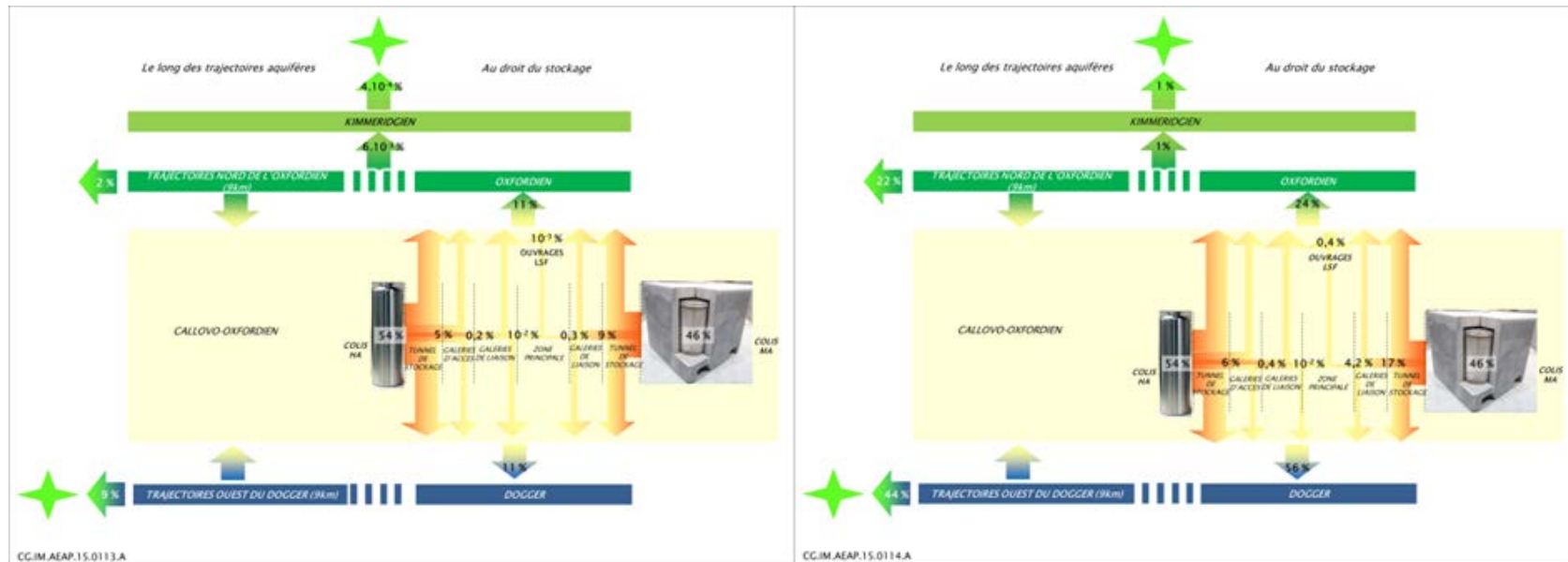


Figure 2.4-1 : Scénario d'évolution normale - Situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) - quartiers HA et MA-VL, iode 129 : synthèse de la répartition des voies de transfert dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis le colis jusqu'aux exutoires – Bilans normés par rapport à l'inventaire initial

2.4.3 Analyse des impacts radiologiques

Le Tableau 2.4-1 donne les doses cumulées maximales (et leurs dates d'occurrence) aux exutoires Barrois et Dogger, en cas de biosphère type tempérée ou chaude.

Pour la situation de référence :

Les doses aux exutoires Barrois et Dogger sont très faibles et très inférieures à la contrainte de dose fixée dans le guide ASN 2008 pour le scénario d'évolution normale :

- le transfert des radionucléides est lent dans l'Oxfordien et diffusif dans les niveaux peu perméables de l'Oxfordien (série grise, C3a) et du Kimméridgien, ce qui permet une atténuation significative du flux atteignant l'exutoire du Barrois par rapport à celui atteignant le toit du Callovo-Oxfordien. Le maximum de dose cumulée est très faible, inférieure à 10^{-6} milli-Sievert par an que ce soit en biosphère tempérée ou chaude. Sa date d'occurrence se situe au-delà du million d'années ;
- pour les radionucléides qui parviennent au Dogger, la date d'occurrence du maximum de dose cumulée est autour de 800 000 ans à l'exutoire (zone de fracturation diffuse) avec une valeur d'ordre de 0,001 milli-Sievert par an que ce soit en biosphère chaude ou biosphère tempérée.

Pour la situation enveloppe :

Les doses aux exutoires Barrois et Dogger sont faibles, très inférieures à la contrainte de dose de 0,25 mSv/an fixée dans le guide ASN de 2008 pour le scénario d'évolution normale :

- pour le stockage implanté avec une garde supérieure de 50 m, le maximum de dose cumulée est de l'ordre de 0,001 milli-Sievert par an en biosphère tempérée et biosphère chaude. Sa date d'occurrence est autour de 340 000 ans ;
- pour le stockage implanté avec une garde inférieure de 50 m, le maximum de dose cumulée est de l'ordre 0,00001 milli-Sievert par an en biosphère chaude et en biosphère tempérée. Son occurrence est entre 210 000 et 250 000 ans respectivement pour la biosphère type tempérée et la biosphère type chaude.

Pour les deux situations (référence et enveloppe), les doses totales (HA + MA-VL) sont dominées par l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79.

Les doses maximales dépendent peu de la biosphère type, la dose maximale étant obtenue pour le pompage au Dogger, en biosphère chaude. La dose maximale est d'environ 0,018 mSv/an, valeur très inférieure à la contrainte de 0,25 mSv/an du guide relatif au stockage géologique (ASN 2008) pour l'évolution normale.

La dose à l'exutoire du Barrois est légèrement inférieure à celle se situant à l'exutoire du Dogger (bien que les débits molaires en sortie du toit et du mur du Callovo-Oxfordien soient similaires).

De par leurs caractéristiques naturelles, les formations encaissantes supérieures apportent une atténuation supplémentaire aux flux de radionucléides arrivant potentiellement aux exutoires par rapport aux flux arrivant au mur et au toit du Callovo-Oxfordien.

Tableau 2.4-1 : Scénario d'évolution normale : doses maximales et occurrence des doses maximales aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les biosphères tempérée et chaude

		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
		Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)
Situation de référence	Pompage au Barrois 150 L.min ⁻¹	4,2.10 ⁻⁰⁷	≥1000	4,8.10 ⁻⁰⁷	≥1000
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) 100 L.min ⁻¹	1,0.10 ⁻⁰³	800	1,1.10 ⁻⁰³	≥1000
Situation enveloppe	Pompage au Barrois 150 L.min ⁻¹ Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 m	1,6.10 ⁻⁰³	340	1,9.10 ⁻⁰³	340
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) 100 L.min ⁻¹ Stockage implanté avec une garde inférieure de 50 m	1,3.10 ⁻⁰²	210	1,8.10 ⁻⁰²	250

3

Les scénarios d'évolutions altérées

<i>3.1</i>	<i>Les SEA de dysfonctionnement des scellements</i>	<i>306</i>
<i>3.2</i>	<i>Les SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA</i>	<i>326</i>

3.1 Les SEA de dysfonctionnement des scellements

3.1.1 Rappel des scénarios retenus

L'objectif de cette section est de décrire les scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements de Cigéo identifiés par l'analyse qualitative des risques et incertitudes conformément à la démarche exposée au Volume I.

Trois scénarios de type SEA¹¹³ sont identifiés (cf. Tableau 3.1-1) :

- le scénario « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ». Les scellements des galeries sont opérants ;
- le scénario « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ». Les scellements des LSF sont opérants ;
- le scénario « Dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et galeries) par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ».

Pour rappel, les scellements des liaisons surface-fond (LSF) et dans une moindre mesure les scellements des galeries contribuent principalement à la fonction de sûreté après fermeture « s'opposer à la circulation d'eau », en limitant les flux d'eau entre le stockage et les formations sus-jacentes. Ces SEA correspondent au dysfonctionnement d'un ou de plusieurs type(s) de ces ouvrages devant concourir à augmenter la résistance hydraulique des galeries et des LSF.

Tableau 3.1-1 : Scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements

SEA de dysfonctionnement des scellements	Typologies de scellements			
	Scellements de puits	Scellements de descendrière	Scellements de galerie	Option avec Scellements de alvéole MA-VL
SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface »	- Noyau <u>efficace</u> - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> , - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> - interface noyau/argilites <u>efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> - interface noyau/argilites <u>efficace</u>
SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »	- Noyau <u>efficace</u> - interface noyau/argilites <u>efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> - interface noyau/argilites <u>efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> , - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> , - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>
SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »	- Noyau <u>efficace</u> , - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> , - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> , - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>	- Noyau <u>efficace</u> , - Interface noyau/argilites <u>non efficace</u>

Les résultats sont présentés pour la situation considérant des dispositifs de fermeture des alvéoles MA-VL de moindre performance qu'un scellement. L'influence de l'option avec scellement des alvéoles MA-VL est néanmoins étudiée dans le cadre du SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface ».

¹¹³ Comme pour le SEN, ces scénarios considèrent les scellements et leurs interfaces dans un état initial saturé.

3.1.2 Description des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

3.1.2.1 SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface (ZFC) »

Ce scénario considère le dysfonctionnement de l'ensemble des scellements des puits et descenderies par l'interface entre le noyau argileux et les argilites.

L'analyse qualitative des risques et incertitudes présentée au chap. 1 conduit à considérer :

- la présence éventuelle d'une zone de fracturation connectée (ZFC) au droit du noyau argileux des scellements des LSF dans l'USC et l'UT, du fait notamment du comportement différé des argilites. L'auto-colmatage imparfait de la ZFC dans l'UT provoquerait un défaut de cicatrisation hydraulique ;
- le gonflement du noyau argileux des scellements des LSF, qui atteint la perméabilité attendue ;
- des scellements de galerie efficaces.

Compte tenu des causes de dysfonctionnement identifiées, la date d'occurrence du SEA est prise égale à la date de début de la phase après fermeture.

Représentation du dysfonctionnement des scellements des LSF

Le dysfonctionnement des scellements est représenté par une dégradation des propriétés hydrauliques par la formation d'une ZFC à l'interface noyau argileux/argilites.

La Figure 3.1-1 ci-dessous est une représentation schématique du dysfonctionnement des scellements de puits. Le dysfonctionnement des scellements de descenderie est représenté de la même manière, excepté les aspects géométriques.

▪ **Extension de la ZFC**

L'extension de la ZFC au droit du noyau argileux est estimée sur la base des observations faites au Laboratoire souterrain Meuse/Haute-Marne, dans la niche au niveau -445 m. Ces observations ne correspondent pas à une ZFC (i.e. fracturation connectée) mais à une fracturation éparse et probablement non connectée longitudinalement. Toutefois ce scénario d'évolution altérée envisage la formation d'une ZFC sur une épaisseur équivalente.

▪ **Perméabilité de la ZFC**

Pour prendre en compte un auto-colmatage imparfait dans l'USC et l'UT, la perméabilité à l'eau de la ZFC est prise égale à celle retenue en situation enveloppe du domaine d'évolution normale, au droit des zones de dépose de revêtement dans l'UA, dégradée de deux ordres de grandeur (cf. Tableau 3.1-2). Elle est représentative d'une cicatrisation hydraulique « efficace » dégradée de trois ordres de grandeur, comme indiqué à la Figure 3.1-1.

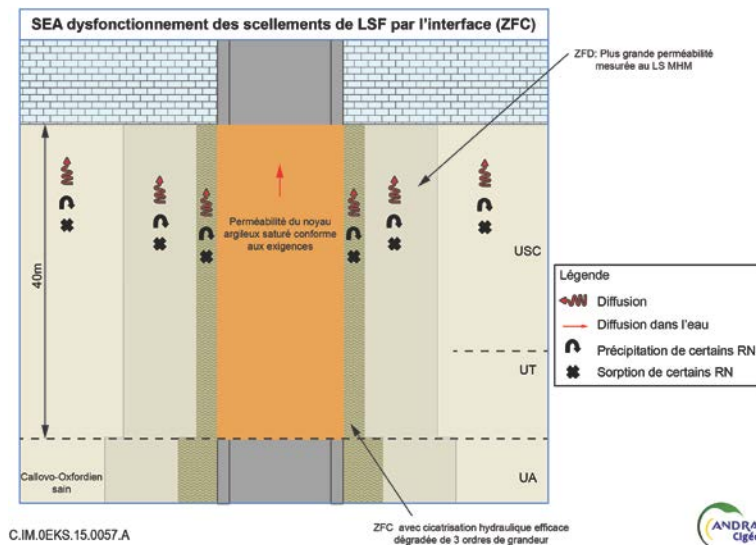


Figure 3.1-1 : Représentation schématique des scellements de puits dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface » (situation enveloppe)

Représentation des ouvrages dans l'USC/UT (au droit des sections courantes des descenderies, hors scellements)

Les argilites au droit des sections courantes des descenderies dans l'USC et l'UT sont représentées de la même manière qu'au droit des noyaux argileux, avec une ZFC et une ZFD telles que représentées dans la Figure 3.1-1.

Représentation des scellements de galerie

Dans ce scénario, les scellements de galerie sont considérés performants. Ils sont donc représentés de la même manière que dans le SEN (cf. section 2.1).

Représentation des ouvrages dans l'UA (hors scellements)

Les alvéoles de stockage ainsi que les sections courantes de galerie et de LSF dans l'UA sont représentés de la même manière que dans le SEN.

3.1.2.2 SEA « Dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface »

Ce scénario considère le dysfonctionnement de l'ensemble des scellements de galerie par l'interface entre le noyau argileux et les argilites.

L'analyse qualitative présentée au chapitre 1 conduit à considérer :

- le dysfonctionnement de l'ensemble des scellements de galeries, qui résulte d'une cicatrisation hydraulique non efficace de la ZFC au droit des zones de dépôt du revêtement du fait d'un cumul peu vraisemblable d'incertitudes ;
- le gonflement du noyau argileux des scellements de galerie, qui atteint la perméabilité attendue ;
- des scellements des LSF performants.

Compte tenu des causes de dysfonctionnement identifiées, la date d'occurrence du SEA est prise égale à la date de début de la phase après fermeture.

Représentation du dysfonctionnement des scellements de galerie

Le dysfonctionnement des scellements de galerie est représenté par une dégradation des propriétés hydrauliques de l'interface noyau argileux/argilites.

La Figure 3.1-2 ci-dessous est une représentation schématique des scellements de galerie dysfonctionnant.

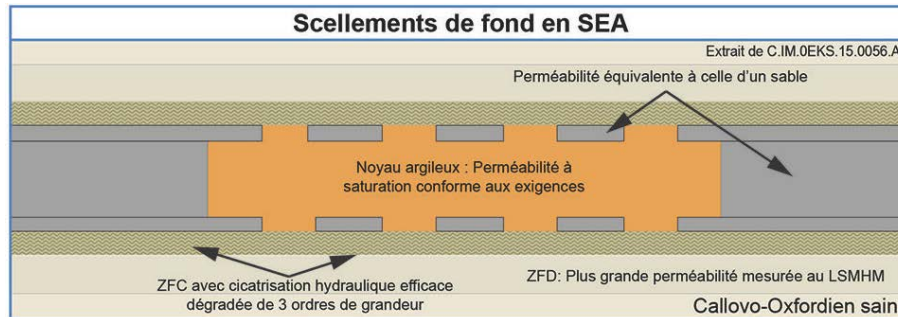


Figure 3.1-2 : Représentation schématique des scellements de galerie dans le SEA
« Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »

▪ **Perméabilité de la ZFC au droit du noyau argileux :**

Pour tenir compte d'une cicatrisation hydraulique non efficace, la perméabilité à l'eau de la ZFC au droit des zones de dépose du revêtement/soutènement et au droit des zones où le revêtement/soutènement est laissé en place est prise avec une valeur représentative d'une cicatrisation hydraulique « efficace » dégradée de trois ordres de grandeur (cf. Tableau 3.1-2).

Représentation des ouvrages dans l'UA (hors scellements)

L'efficacité moindre de la cicatrisation hydraulique est également prise en compte dans la ZFC et la ZFD au droit des autres ouvrages réalisés dans l'UA (sections courantes de galerie, LSF, alvéoles de stockage). Il en résulte que :

- la ZFC au droit de ces zones présente une perméabilité à l'eau représentative d'une cicatrisation hydraulique « efficace » dégradée de trois ordres de grandeur ;
- la ZFD est représentée avec une perméabilité conservatrice.

Représentation des ouvrages dans l'USC/UT

Dans ce scénario, les scellements des LSF sont représentés de la même manière que dans le SEN.

3.1.2.3 SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »

Ce scénario considère le dysfonctionnement par l'interface de tous les ouvrages de fermeture (galeries et LSF) devant concourir à augmenter la résistance hydraulique des ouvrages du stockage. Il considère une cause commune de dysfonctionnement, à savoir les effets combinés du comportement différé des argilites et d'un auto-colmatage imparfait de la ZFC. Le noyau argileux des scellements de galerie et des LSF atteint la perméabilité attendue.

La Figure 3.1-3 est fournie à titre d'illustration. Elle représente une coupe schématique illustrant le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » avec les hypothèses de la situation enveloppe du SEN.

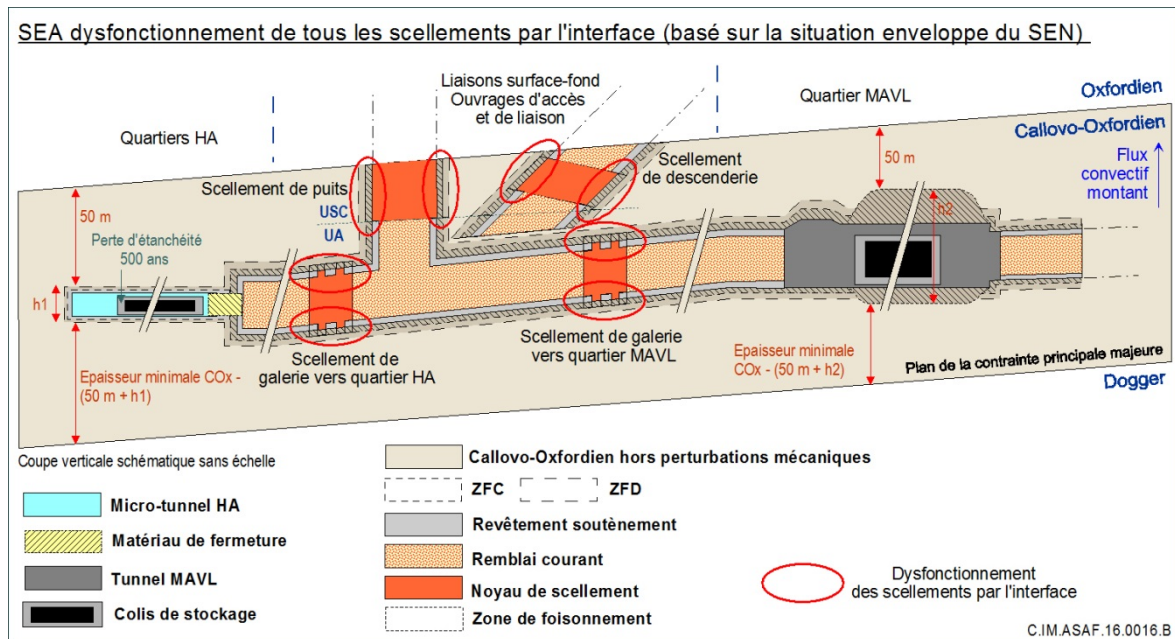


Figure 3.1-3 : Coupe schématique illustrant les différents composants du stockage dans le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » - cas avec ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL de moindre performance

Représentation du dysfonctionnement des scellements des LSF

Le dysfonctionnement des scellements de LSF est représenté de la même manière que dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface » (cf. Figure 3.1-1).

Représentation du dysfonctionnement des scellements de galerie

Le dysfonctionnement des scellements de galerie est représenté de la même manière que dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface » (cf. Figure 3.1-2).

Représentation des ouvrages dans l'USC/UT (au droit des sections courantes des descenteries, hors scellements)

Les argilites au droit des sections courantes des descenteries dans l'USC et l'UT sont représentées de la même manière qu'au droit des noyaux argileux, avec une ZFC et une ZFD telles que représentées dans la Figure 3.1-1.

Représentation des ouvrages dans l'UA (hors scellements)

Les ouvrages hors scellements de l'UA (sections courantes de galerie, LSF, alvéoles de stockage) sont représentés de la même manière que dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface » :

- la perméabilité à l'eau de la ZFC est représentative d'une cicatrisation hydraulique « efficace » dégradée de trois ordres de grandeur ;
- la ZFD est représentée avec une perméabilité conservatrice.

3.1.2.4 Conceptualisation des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

La conceptualisation physique et numérique des SEA de dysfonctionnement des scellements est la même que celle associée au SEN (cf. chapitre 2.1).

Le relâchement des radionucléides par les colis de stockage est représenté de la même manière que dans le SEN (cf. Volume II-chapitre 2).

Les propriétés hydrauliques des argilites initialement fracturées (ZFC et ZFD), dégradées par rapport à celles du SEN, sont résumées au Tableau 3.1-2.

Tableau 3.1-2 : Valeur des perméabilités des argilites endommagées mécaniquement pour les scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements par la ZFC (les valeurs dégradées dans le cadre des SEA sont ombrées)

Unité	Zone d'argilites endommagées	Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	SEA scellements des LSF	SEA scellements de galerie	SEA tous les scellements	SEN	SEA scellements des LSF	SEA scellements de galerie	SEA tous les scellements
UA	ZFC au droit des zones de dépose	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸
	ZFC au droit du revêtement	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸
	ZFD	N/A	N/A	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰
USC/UT	ZFC au droit du noyau	N/A	10 ⁻⁸	N/A	10 ⁻⁸	N/A	10 ⁻⁸	N/A	10 ⁻⁸
	ZFC au droit du revêtement	N/A	10 ⁻⁸	N/A	10 ⁻⁸	N/A	10 ⁻⁸	N/A	10 ⁻⁸
	ZFD	N/A	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹

Les propriétés de transfert diffusif et de rétention dans la ZFC et la ZFD sont représentées par les mêmes paramètres que dans le cadre du SEN, en situation de référence et en situation enveloppe.

La Figure 3.1-4 ci-dessous propose une représentation schématique des voies de transfert dans le cadre des SEA de dysfonctionnement des scellements.

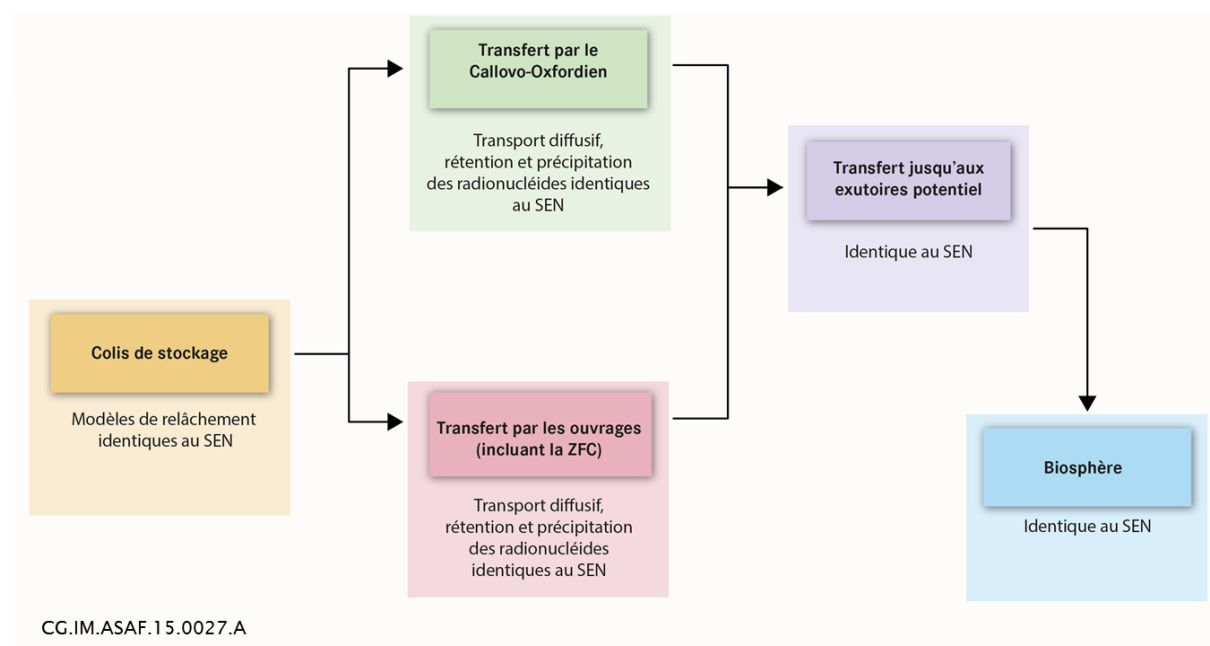


Figure 3.1-4 : Représentation schématique des transferts dans le cadre des SEA de dysfonctionnement des scellements (relâchement et voies de transfert par le Callovo-Oxfordien et les ouvrages)

3.1.3 Traitement des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

La performance du système en cas de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture par l'interface, est évaluée par des indicateurs intermédiaires. Les mêmes indicateurs que pour le SEN (voir chapitre 2.2) sont retenus, à savoir :

- les temps de transfert et la capacité de drainage du stockage : ces indicateurs permettent d'évaluer les temps de transfert diffusif/convectif dans le Callovo-Oxfordien et dans les galeries d'accès et de liaison à partir de chaque quartier. Cet indicateur est notamment approprié pour évaluer la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » ;
- les quantités de radionucléides transitant par la voie ouvrages et migrant par diffusion dans le Callovo-Oxfordien permettent d'apprécier la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ».

L'impact radiologique n'est évalué que pour le scénario de « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface », scénario jugé enveloppe par rapport aux deux autres.

3.1.4 Résultats des SEA de dysfonctionnement des scellements

3.1.4.1 Analyse des effets du dysfonctionnement des scellements par l'interface (ZFC) sur les circulations d'eau dans le stockage

Pour mémoire, du fait de la position du quartier MA-VL en « amont hydraulique » par rapport aux ouvrages de liaison surface-fond vis-à-vis des écoulements dans l'Oxfordien en SEN, l'essentiel de l'eau drainée par les ouvrages de liaison surface-fond provient du quartier MA-VL. La contribution hydraulique des quartiers HA, en particulier HA1/HA2 est très faible.

SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface (ZFC) »

Avec les hypothèses de la situation de référence du SEN, le dysfonctionnement par l'interface des seuls scellements des LSF (c'est-à-dire les scellements de galeries étant efficaces) conduit à des débits d'eau à la sortie des ouvrages de LSF plus importants, environ quelques centaines de litres par an, provenant essentiellement de la zone principale, et non du quartier MA-VL et des quartiers HA du fait des scellements de galeries efficaces.

L'efficacité des scellements de galeries leur permet en effet d'assurer des pertes de charges et ainsi de limiter les vitesses d'écoulement, de l'ordre de 100 m par 100 000 ans dans le quartier MA-VL, soit une valeur proche de celle évaluée dans le cadre du scénario d'évolution normale (tous scellements efficaces).

Avec les hypothèses de la situation enveloppe du SEN, la charge hydraulique de l'Oxfordien se transmet jusqu'à la base des puits et descenderies et conduit à des débits d'eau de l'ordre de 2 m³ par an provenant de la zone centrale et d'une partie de la zone MA-VL (cf. Tableau 3.1-3). L'influence de la perturbation hydraulique reste néanmoins limitée du fait de l'efficacité des scellements de galeries (cf. Figure 3.1-5) qui leur permet d'assurer des pertes de charges encore significatives¹¹⁴.

La vitesse d'écoulement de l'eau en sortie de quartier MA-VL est plus importante, de l'ordre de 2,5 km par 100 000 ans, supérieure d'un facteur 4 à celle évaluée en scénario d'évolution normale (cf. Tableau 3.1-3). Cette vitesse, qui apparaît importante intrinsèquement, est néanmoins faible en regard de la capacité de diffusion des radionucléides depuis les galeries vers le Callovo-Oxfordien (cf. *supra*).

¹¹⁴ De l'ordre de 4 mètres à ce stade

SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »

Avec les hypothèses de la situation de référence du SEN, le dysfonctionnement des seuls scellements de galerie (c'est-à-dire les scellements des LSF étant efficaces) conduit à des débits d'eau de l'ordre de quelques litres par an à la sortie des ouvrages de LSF, similaires à ceux évalués en SEN (tous scellements efficaces). L'efficacité des scellements de LSF permet d'assurer à elle seule la limitation des flux d'eau dans les ouvrages du stockage (cf. Tableau 3.1-3).

Avec les hypothèses de la situation enveloppe du SEN, le dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface se traduit par des débits d'eau à la sortie des LSF inférieurs à ceux évalués en scénario d'évolution normale (cf. Tableau 3.1-3). Ce paradoxe apparent tient au fait que les circulations d'eau au sein des ouvrages du stockage sont alors pilotées par le gradient hydraulique horizontal de l'Oxfordien (du quartier MA-VL vers les quartiers HA) et se compensent mutuellement. La vitesse d'écoulement est ainsi de l'ordre de 3 km par 100 000 ans en sortie de quartier MA-VL et de l'ordre de 2,5 km par 100 000 ans dans les galeries de liaison principales du quartier HA1/2.

SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »

Ce scénario se traduit par une perturbation hydraulique dans le stockage plus importante que pour les deux autres SEA, dans la mesure où tous les scellements contribuant à générer une résistance hydraulique dans le stockage (galeries et LSF) présentent un dysfonctionnement par l'interface. La charge hydraulique de l'Oxfordien calcaire se propage ainsi plus facilement depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusque dans le stockage.

Cette propagation est accentuée avec les hypothèses de la situation enveloppe du SEN (cf. Figure 3.1-5). La charge hydraulique de l'Oxfordien calcaire se propage alors dans l'ensemble du stockage et engendre un transfert convectif dominant depuis les quartiers de stockage vers les liaisons surface-fond : le débit d'eau en sortie des LSF est donc plus important, de l'ordre de 4 m³ par an, et provient de l'ensemble du stockage (zone principale et quartiers HA et MA-VL) (cf. Tableau 3.1-3).

Tableau 3.1-3 : Débits d'eau sortant des LSF et vitesses d'écoulement en sortie de quartier MA-VL pour le SEN et les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (hypothèses de la situation de référence et enveloppe du SEN)

Scénario	Débit d'eau sortant des LSF (L.an ⁻¹)		Vitesse d'écoulement en sortie de quartier MA-VL (mm.an ⁻¹)	
	Situation de référence	Situation enveloppe	Situation de référence	Situation enveloppe
SEN (tous scellements efficaces)	6	70	0,5	6
SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface »	250	230	1,25	25
SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »	1	50	7,5	28
SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »	50	370	10	45

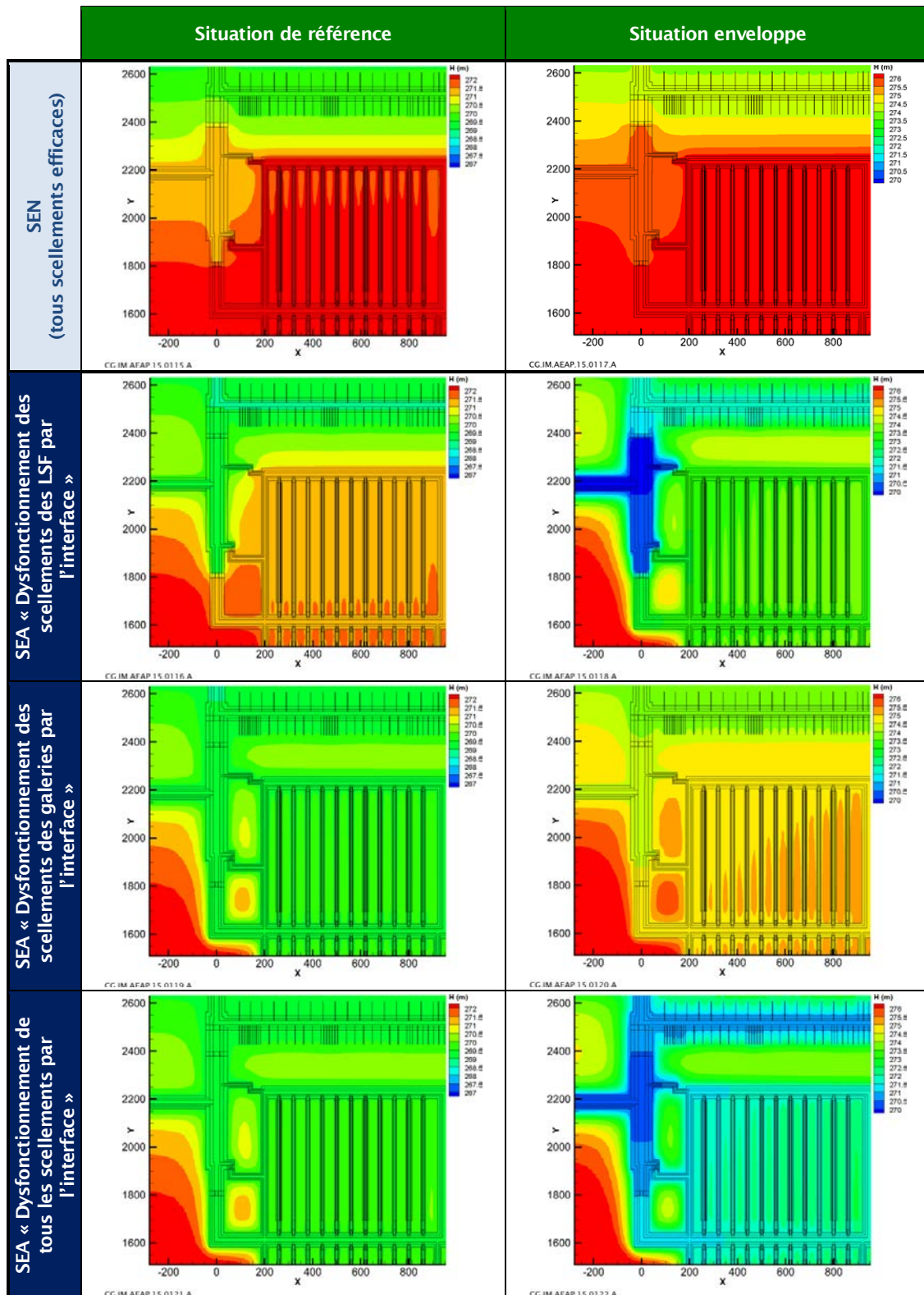


Figure 3.1-5 : SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface, hypothèses de la situation de référence (gauche) et enveloppe (droite) du SEN - Champs de charges hydrauliques (m) dans la zone MA-VL.

3.1.4.2 Analyse des résultats vis-à-vis du transfert des radionucléides

La capacité du stockage et du Callovo-Oxfordien à retarder et atténuer la migration des radionucléides dans les différents scénarios de dysfonctionnement des scellements par l'interface (ZFC) est présenté ci-après pour l'iode 129, pour le chlore 36 et les autres radionucléides dont le débit molaire en sortie du Callovo-Oxfordien est supérieur à 10^{-10} mol/an.

Le transfert de l'iode 129

Pour le scénario d'évolution normale (situations de référence et enveloppe), la diffusion est le processus de transfert dominant des radionucléides dans tous les composants du stockage. Le dysfonctionnement des scellements par l'interface provoque un accroissement des vitesses de transfert par convection dans les ouvrages du stockage et augmente ainsi le transfert des radionucléides depuis les colis jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien par la voie de transfert « ouvrages ».

Avec les hypothèses de la situation de référence du SEN, le caractère dominant ou non de la convection et de la diffusion varie :

- en cas de dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface, la convection est dominante seulement dans les liaisons surface-fond et il y a codominance diffusion/convection dans la zone principale jusqu'aux quartiers HA et MA-VL ;
- en cas de dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface, la convection est dominante à la fois dans les galeries des quartiers HA et MA-VL et dans la zone principale, et la diffusion reste dominante dans les ouvrages de liaison surface-fond ;
- en cas de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, la convection devient dominante dans tous les composants du stockage.

La Figure 3.1-6 représente, pour chacun des scénarios le processus de transfert dominant dans les galeries principales, les liaisons surface-fond et au sein du Callovo-Oxfordien, avec les données de la situation de référence du SEN.

Les résultats sont similaires pour la situation enveloppe du SEN, excepté à l'exception du SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface » pour lequel la convection est dominante dans les galeries.

Dans tous les SEA de dysfonctionnement par l'interface des scellements, du fait de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et des faibles gradients de charge au sein du stockage, la convection des solutés reste néanmoins limitée dans les ouvrages, depuis les alvéoles jusqu'aux ouvrages de liaison surface-fond, pour permettre un transfert par diffusion des radionucléides des galeries vers le Callovo-Oxfordien.

La voie de transfert par le Callovo-Oxfordien reste donc la voie de transfert principale.

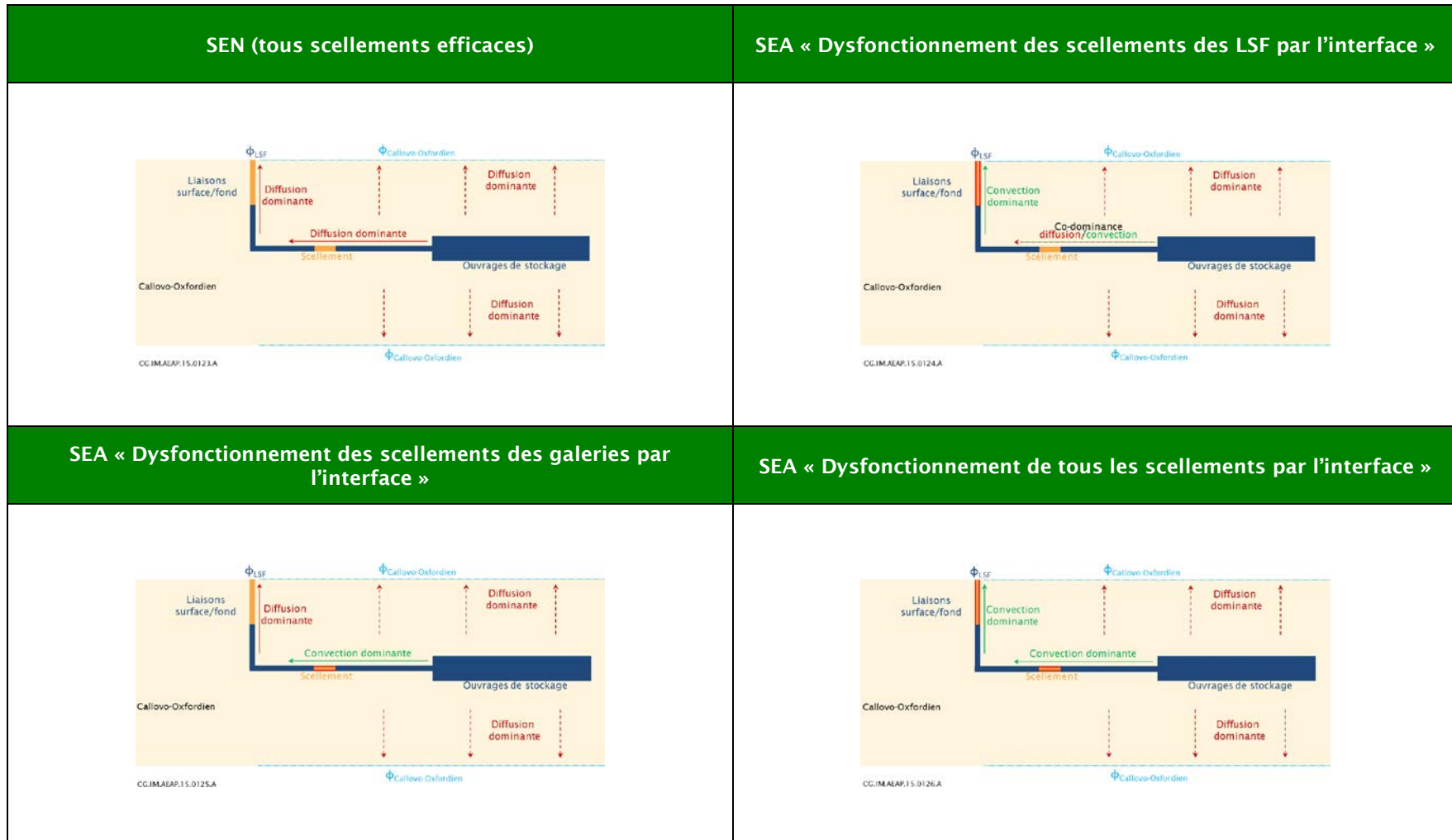


Figure 3.1-6 : SEN et les SEA de dysfonctionnement des scellements - situation de référence : représentation des processus de transfert des solutés au sein du stockage et du Callovo-Oxfordien

Le dysfonctionnement des ouvrages de fermeture est susceptible d'augmenter et accélérer le transfert des radionucléides par la voie ouvrages. Pour évaluer cet effet, les proportions d'iode 129 (en pourcentage de l'inventaire initial) qui empruntent la voie ouvrages et la voie Callovo-Oxfordien sont comparées dans le Tableau 3.1 4.

La Figure 3.1 7 ci-dessous montre, pour le SEA de « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface », l'atténuation du niveau de débit molaire maximal depuis la sortie des alvéoles MA-VL jusqu'aux ouvrages de liaison surface-fond. Elle met en exergue les éléments d'analyse suivants :

- pour tous les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture, la quantité cumulée d'iode 129 sortant des LSF est inférieure à celle migrant par le Callovo-Oxfordien.
- seule la configuration de dysfonctionnement par l'interface de l'ensemble des scellements implique une voie de transfert par les ouvrages supérieure à celle par le Callovo-Oxfordien mais pendant quelques milliers d'années et à des niveaux de débits molaires très faibles (inférieurs aux débits molaires maxima par la voie Callovo-Oxfordien).
- la quantité de l'inventaire initial en iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond est néanmoins augmentée (13 % contre 1% avec les données de la situation de référence du SEN).
- avec les données de la situation de référence du SEN, la date d'occurrence du maximum de débit en sortie des LSF se situe vers 200.000 ans. Elle est significativement plus précoce que celle en SEN qui est supérieure à un million d'années). Cependant, du fait d'un transfert convectif qui reste limité, le débit molaire en iode 129 est fortement atténué dans le stockage (atténuation d'un facteur 120 du débit molaire maximum entre l'entrée des galeries MA-VL et la sortie des LSF) ;
- avec les données du SEN en situation enveloppe, les vitesses de transfert par convection des radionucléides au sein des galeries sont plus élevées et limitent les échanges (par diffusion) avec le Callovo-Oxfordien. Cette limitation est néanmoins relative car le facteur d'atténuation est d'environ 90. La date d'occurrence du débit molaire maximum est significativement plus courte (environ 30 000 ans).

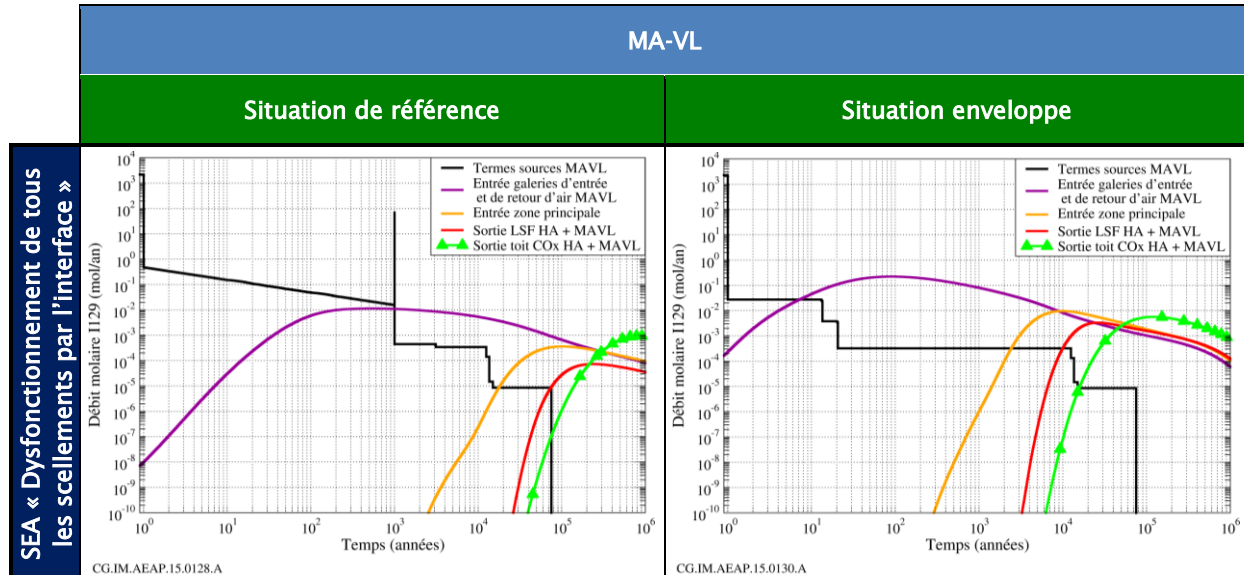


Figure 3.1-7 : SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface - Historique des débits molaires d'iode 129 entrants dans les galeries d'entrée et de retour d'air et dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Le Tableau 3.1-4 montre que l'iode 129 entrant dans la zone principale provient essentiellement du quartier MA-VL. En effet, de par son positionnement proche des LSF, les quantités d'iode 129 sortant des alvéoles MA-VL par les galeries d'accès sont plus sensibles au dysfonctionnement des scellements par l'interface. Ainsi, la quantité d'iode issue du quartier MA-VL et parvenant à la zone principale est augmentée d'environ un ordre de grandeur en cas de dysfonctionnement des scellements de galerie ou

des LSF par rapport au SEN, mais cette quantité reste limitée en regard de celle migrant par le Callovo-Oxfordien.

Tableau 3.1-4 : *SEN situations de référence et enveloppe - Bilan des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total HA et MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, dans les galeries de liaison, dans la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien (*

		Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial de chaque zone)							
		Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	SEA scelléments LSF	SEA scelléments galeries	SEA tous scelléments	SEN	SEA scelléments LSF	SEA scelléments galeries	SEA tous scelléments
HA	Entrée dans les galeries d'accès	5 %	6 %	6,1 %	6,1 %	5,8 %	8 %	5,4 %	9,1 %
	Entrée dans les galeries de liaison	0,2 %	0,3 %	0,1 %	0,1 %	0,4 %	1,5 %	< 0,1 %	2,9 %
	Entrée dans la zone principale	< 10 ⁻² %	< 10 ⁻² %	< 10 ⁻⁴ %	< 10 ⁻³ %	< 10 ⁻² %	0,5 %	< 10 ⁻⁴ %	2,0 %
MA-VL	Entrée galeries liaison (accès / retour d'air)	10,2 %	10,4 %	16,2 %	17,1 %	17,6 %	25,1 %	25,5 %	34,8 %
	Entrée dans la zone principale	0,4 %	1,2 %	6,9 %	7,6 %	5,1 %	24,5 %	17,7 %	35,9 %
HA + MA-VL	Sortie des LSF	< 10 ⁻⁴ %	< 0,1 %	< 0,1 %	1,0 %	0,2 %	6,9 %	0,9 %	13 %
	Sortie toit du Callovo-Oxfordien	10,9 %	10,9 %	10,9 %	10,9 %	55,7 %	51,9 %	55,2 %	48,5 %

La Figure 3.1-8 présente l'historique des débits molaires d'iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien au droit du stockage pour le SEN (tous scellements efficaces) et les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Le Tableau 3.1 5 présente les quantités cumulées sur un million d'années d'iode 129 qui traversent les ouvrages du stockage et atteignent le toit du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages ou par le Callovo-Oxfordien.

Les évaluations réalisées avec les données de la situation de référence du SEN montrent que :

- le maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des ouvrages de liaison surface-fond est très inférieur à celui de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien, d'un un facteur respectif de 10 (tous scellements dysfonctionnant), 400 (dysfonctionnement des scellements des LSF ou des galeries), et 25.000 (tous scellements efficaces) ;
- le scénario de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface génère une voie de transfert par les ouvrages supérieure à celle par le Callovo-Oxfordien pendant 20 000 ans, mais à un niveau de débit molaire inférieure ou similaire à celui par le Callovo-Oxfordien, qui par ailleurs est identique à celui en SEN ;
- le dysfonctionnement des scellements n'a aucun effet sur les débits molaires de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien, soulignant ainsi le rôle fondamental joué par le celui-ci.

La comparaison des résultats entre la configuration de dysfonctionnement des scellements des galeries et celle de dysfonctionnement des scellements des LSF montre une certaine redondance de ces scellements. En effet, l'efficacité de l'un ou l'autre des scellements permet d'atténuer le maximum de débit molaire par la voie ouvrages d'un facteur 40 par rapport à une situation de dysfonctionnement de

l'ensemble des scellements, et de garantir que le transfert par le Callovo-Oxfordien reste toujours dominant.

Toutefois, le dysfonctionnement des scellements de galeries provoque un transfert par convection dominante dans les galeries (cf. Figure 3.1-8), ce qui conduit à une date d'occurrence du débit molaire maximal à 400 000 ans en sortie des LSF, à comparer aux 200 000 ans en cas de dysfonctionnement de tous les scellements).

Les évaluations réalisées avec les données de la situation enveloppe du SEN conduisent à des observations similaires :

- les maxima de débit molaire instantané d'iode 129 en sortie des ouvrages de liaison surface-fond sont inférieurs à ceux traversant le Callovo-Oxfordien, d'un facteur 1,7 (tous scellements dysfonctionnant), de 7 (scellements des LSF dysfonctionnant), de 50 (scellements de galerie dysfonctionnant) et de 400 (tous scellements efficaces) ;
- le scénario de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface génère une voie de transfert par les ouvrages supérieure à celle par le Callovo-Oxfordien qui est similaire à celle du SEN. En cas de dysfonctionnement des scellements des LSF uniquement, elle est supérieure à la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien pendant une durée plus petite (environ 25 000 ans).

Dans le SEA « dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface », un transfert diffusif dominant est conservé dans les liaisons surface-fond. Il permet une atténuation du maximum de débit molaire sortant des LSF environ 7 fois plus élevée que celle du SEA « dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface ».

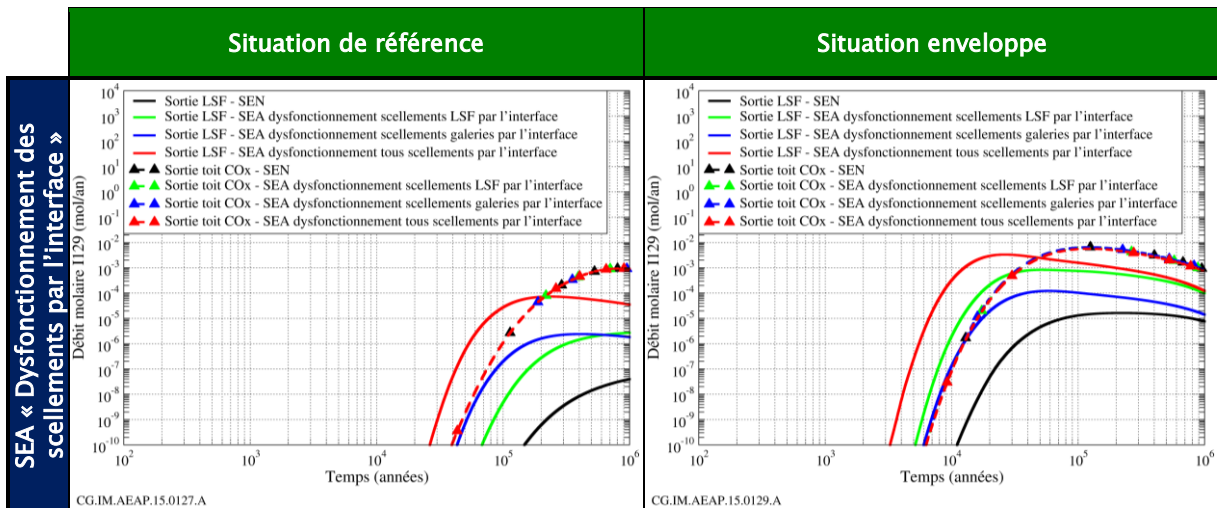


Figure 3.1-8 : SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements - Historique des débits molaires d'iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Tableau 3.1-5 : SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface - Débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maxima et rapport entre les maxima par la voie ouvrage et la voie du Callovo-Oxfordien

		Débits molaires maximum d'iode 129							
		Situation de référence				Situation Enveloppe			
		SEN	SEA scellements LSF	SEA scellements galeries	SEA tous scellements	SEN	SEA scellements LSF	SEA scellements galeries	SEA tous scellements
Transfert par les argilites	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10 ⁻⁶ moles/an)	930	930	930	930	6500	6100	6500	5700
	Date d'occurrence (milliers d'années)	840	840	840	840	120	120	120	120
Transfert par la voie ouvrages	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10 ⁻⁶ moles/an)	0,04	2,7	2,4	73	16	840	120	3300
	Date d'occurrence (milliers d'années)	>1000	>1000	410	240	220	51	58	26
Rapport des maxima de débit molaire voie argilites / voie ouvrages		23 000	340	390	13	400	7	53	1,7

▪ **Sensibilité des résultats à la mise en place ou non de scellements d'alvéole MA-VL**

L'option avec scellement des alvéoles MA-VL est étudiée vis-à-vis du transfert de l'iode 129, pour le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface ». La sensibilité à la mise en place de scellements d'alvéoles MA-VL est étudiée en comparant les résultats obtenus pour un dysfonctionnement des scellements d'alvéoles MA-VL par l'interface.

Le Tableau 3.1 6 ci-dessous montre les éléments majeurs suivants :

- avec les données de la situation de référence du SEN, la mise en place des scellements aux extrémités des alvéoles MA-VL conduit à des débits molaires similaires à ceux pour des ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL de moindre performance. Dans la configuration de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, les débits molaires instantanés d'iode 129 sortant des alvéoles MA-VL ne sont diminués que de 20 % au maximum ;
- avec les données de la situation enveloppe du SEN, la mise en place des scellements aux extrémités des alvéoles MA-VL conduit à des débits molaires quasi-similaires (à 10 % près) à ceux pour des ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL de moindre performance.

Tableau 3.1-6 : SEA de dysfonctionnement de tous les scellements (situations de référence et enveloppe). Bilan des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage de l'inventaire total du quartier MA-VL) entrant dans les galeries de liaison, dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien -

	Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial du quartier MA-VL)			
	SEA de dysfonctionnement de tous les scellements			
	Situation de référence		Situation enveloppe	
	Sans scellement	Avec scellement MA-VL dysfonctionnant	Sans scellement	Avec scellement MA-VL dysfonctionnant
Entrée dans les galeries de liaison/accès et retour d'air	17,1 %	14,4 %	34,8%	32,5 %
Entrée zone principale	7,6 %	6,4 %	35,9 %	32,8 %
Sortant des LSF	2,1 %	1,7 %	25,9 %	23,6 %
Sortie toit du Callovo-Oxfordien	10,4 %	10,4 %	36,7 %	37,8 %

Le transfert du chlore 36

Le comportement du chlore 36 dans le système de stockage, présenté à la Figure 3.1-9 est comparable à celui de l'iode 129 (Figure 3.1-8). Cependant l'écart entre la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien et celle des ouvrages est beaucoup plus important que pour l'iode 129. Ce constat, qui prévaut également pour le SEN, est lié à la période radioactive du chlore 36 inférieure au temps de transfert dans les galeries, permettant ainsi de bénéficier d'une décroissance radioactive supplémentaire, et à la sorption du chlore 36 dans les bétons des alvéoles MA-VL.

La fraction de l'inventaire initial en chlore 36 qui sort du Callovo-Oxfordien par les ouvrages de liaison surface-fond dépend du scénario de dysfonctionnement considéré : elle reste inférieure à celle par la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien (environ 3 à 6 ordres de grandeur avec les hypothèses de la situation de référence et de 2 à 4 ordres de grandeur avec les hypothèses de la situation enveloppe). Ainsi, moins de 0,1% de l'inventaire initial en chlore 36 sortent du Callovo-Oxfordien par les ouvrages de liaison surface-fond.

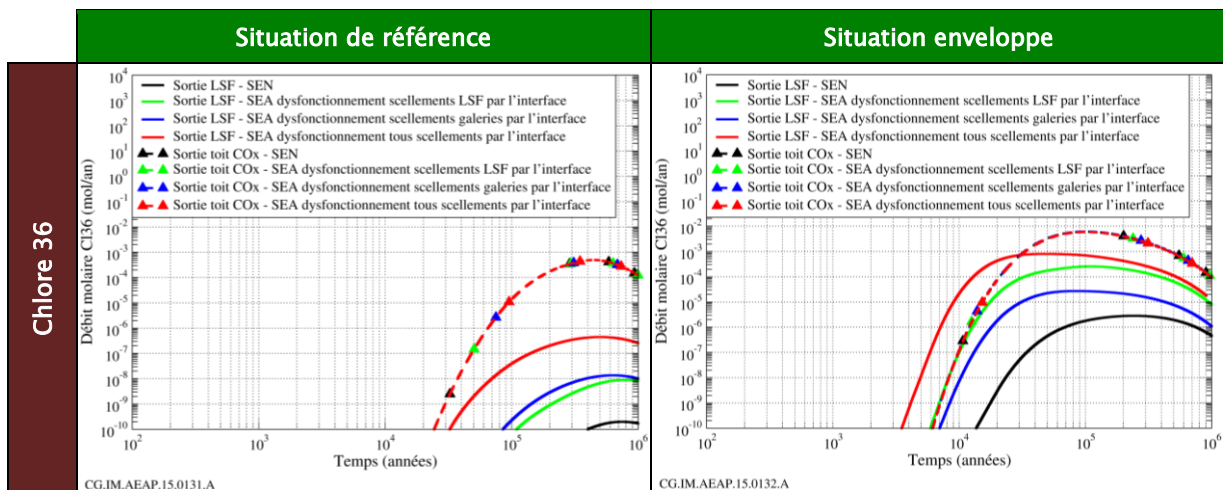


Figure 3.1-9 : *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements (situations de référence et enveloppe) -Historiques de débit molaire de chlore 36 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien -*

Les autres radionucléides

Le transfert de la plupart des autres radionucléides qui migrent suivant les ouvrages du stockage, est totalement atténué, soit du fait de leur période inférieure au temps de transfert, soit du fait d'un transfert vers le Callovo-Oxfordien tout au long du transfert par les ouvrages de stockage (effet de pompe du Callovo-Oxfordien du fait de ses capacités de sorption).

En plus de l'iode 129 et du chlore 36, les radionucléides dont le débit molaire excède 10^{-10} moles par an dans le scénario de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface sont (Figure 3.1-10) sont :

- en considérant les hypothèses de la situation de référence : le sélénium 79 et l'aluminium 26, mobiles à vie longue et peu solubles, et le carbone 14, mobile et de période plus courte que les autres radionucléides qui contribuent à l'impact ;
- en considérant les hypothèses de la situation enveloppe : le calcium 41, le potassium 40, faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et dans le Callovo-Oxfordien, le molybdène 93, mobile à vie moyenne, et les uraniums 235 et 238, moins sorbés dans le Callovo-Oxfordien (dans cette situation).

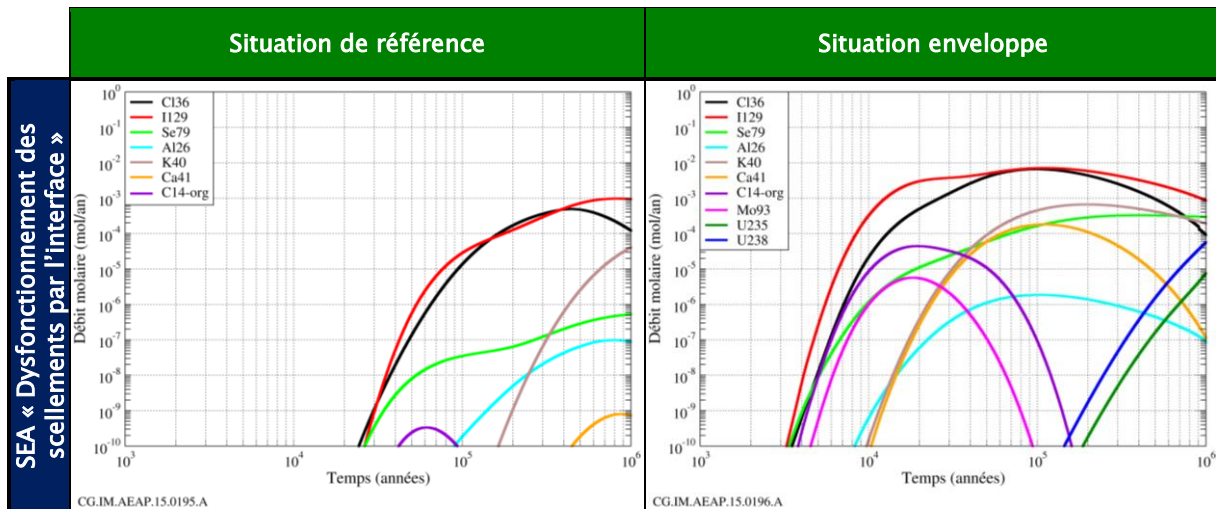


Figure 3.1-10 : SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface (situations de référence et enveloppe) - Historique des débits molaires des radionucléides dont le débit molaire cumulé au toit du Callovo-Oxfordien excède 10^{10} moles par an -

3.1.4.3 Évaluation de l'impact

L'impact pour le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface (ZFC) » est calculé en distinguant :

- l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour lequel les radionucléides transitent par l'Oxfordien. Il résulte des deux voies de migration :
 - ✓ la voie de transfert par les ouvrages, affectée par le dysfonctionnement des scellements ;
 - ✓ la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien ;
- l'exutoire « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », qui n'est pas influencé par le dysfonctionnement des scellements (les doses sont pilotées par la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien, et sont donc identiques à celles du SEN).

Sur la base des hypothèses de la situation de référence du SEN

Comme analysé précédemment, la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est prépondérante sur celle par les ouvrages pour l'ensemble des radionucléides. Les débits molaires au niveau du toit du Callovo-Oxfordien sont similaires à ceux obtenus pour le SEN.

Les débits molaires traversant les encaissements sus-jacents et sous-jacents ainsi que les historiques de doses associés aux exutoires « pompage dans le Barrois » et « pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » sont identiques à ceux obtenus pour le SEN en situation de référence (cf. chapitre 0). Par rapport au SEN, seul le carbone 14 apparaît (suivant la voie de transfert ouvrages) : cependant du fait de sa période radioactive petite en regard des temps de transfert dans les encaissements sus-jacents, les débits molaires en carbone 14 sont fortement atténués lors de leur transfert dans les encaissements. La dose à l'exutoire liée au carbone 14 est in fine négligeable.

Sur la base des hypothèses en situation enveloppe

La Figure 3.1-11 présente les évolutions de doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour une biosphère type tempérée et pour une biosphère type climat chaud. Le Tableau 3.1-7 indique les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces maxima.

La dose totale est pilotée par le chlore 36 et le sélénium 79, avec un maxima de l'ordre de 0,002 millisievert à environ 350 000 ans. La comparaison avec le SEN (Tableau 3.1-7) ne révèle pas de différence significative, excepté pour le sélénium 79 pour lequel le transfert par la voie ouvrage augmente progressivement du fait de sa solubilité. Il devient le premier contributeur à la dose autour de 500 000 ans.

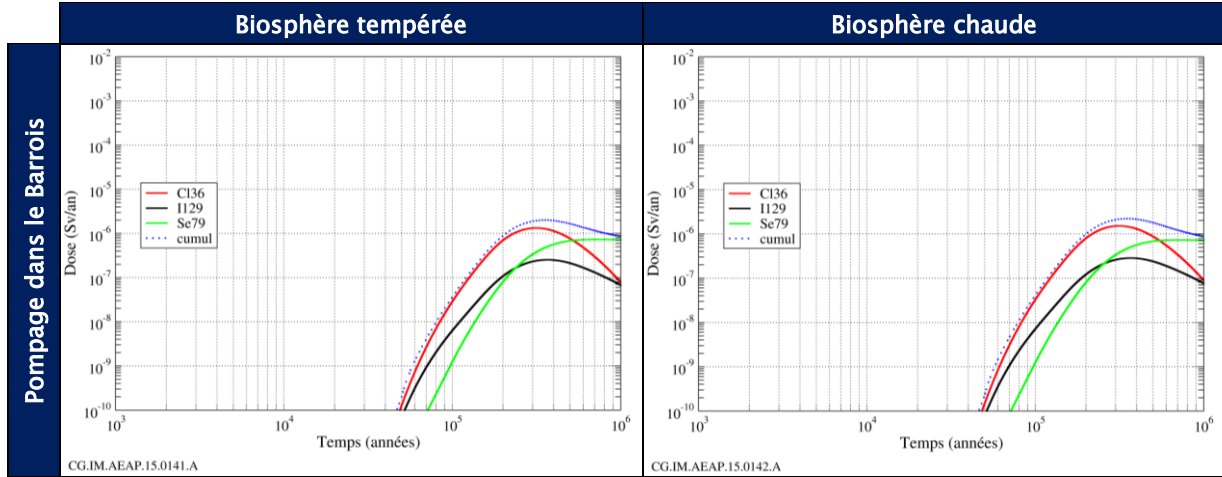


Figure 3.1-11 : Historique des doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude - SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » (situation enveloppe)

Tableau 3.1-7 : SEN et SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude (situation enveloppe)

RN	SEN (tous scellements efficaces)				SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »			
	Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Dose maximale (mSv/an)	Date d'occurrence de la dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date d'occurrence de la dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date d'occurrence de la dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date d'occurrence de la dose maximale (milliers d'années)
³⁶ Cl	1,2.10 ⁻⁰³	320	1,4.10 ⁻⁰³	320	1,3.10 ⁻⁰³	310	1,5.10 ⁻⁰³	310
¹²⁹ I	2,1.10 ⁻⁰⁴	380	2,3.10 ⁻⁰⁴	380	2,3.10 ⁻⁰⁴	370	2,6.10 ⁻⁰⁴	370
⁷⁹ Se	3,7.10 ⁻⁰⁴	730	4,4.10 ⁻⁰⁴	730	7,3.10 ⁻⁰⁴	730	7,3.10 ⁻⁰⁴	730
Cumul	1,6.10 ⁻⁰³	340	1,9.10 ⁻⁰³	340	2,0.10 ⁻⁰³	360	2,2.10 ⁻⁰³	350

3.1.5 Enseignements des SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture

Du point de vue du comportement hydraulique, en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface, l'effet sur le régime hydraulique dans les ouvrages du stockage reste limité en raison de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, des performances des noyaux argileux des scellements qui ne sont pas dégradées et de l'architecture du stockage, notamment sa borgnitude qui mobilise les faibles flux d'eau dans le Callovo-Oxfordien et la disposition groupée des ouvrages de liaison surface-fond (puits et base des descenderies) :

- avec les données de la situation de référence du SEN : les vitesses d'écoulement dans la zone MA-VL (la plus sollicitée du point de vue hydraulique) sont de l'ordre de 100 m par 100 000 ans

- avec les données de la situation de référence du SEN : les vitesses d'écoulement dans la zone MA-VL (la plus sollicitée du point de vue hydraulique) sont de l'ordre de 100 m par 100 000 ans (dysfonctionnement des scellements de LSF) à 1 km par 100 000 ans (dysfonctionnement des scellements de galerie ou de l'ensemble des scellements) (cf. Tableau 3.1 3) ;
- avec les données de la situation enveloppe : les vitesses d'écoulement au sein des ouvrages du stockage sont 25 fois plus importantes que celles avec les données de la situation de référence du SEN. Néanmoins, les débits d'eau dans la zone MA-VL restent très limités (un peu moins de 4 m³ par an en cas de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface).

Ces vitesses d'écoulement dans les ouvrages restent limitées en regard de la grande surface d'échanges offerte par les ouvrages avec le Callovo-Oxfordien, d'où un transfert significatif vers le Callovo-Oxfordien des radionucléides qui migrent suivant les ouvrages.

Les radionucléides qui atteignent le toit du Callovo-Oxfordien (i.e. pour un débit molaire supérieur à 10⁻¹⁰ mol/an au cours du million d'années) en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface sont les mêmes que ceux pour le SEN, à savoir les radionucléides mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79 et aluminium 26), ainsi que le potassium 40 et le calcium 41, moins mobiles, auxquels s'ajoutent le carbone 14 organique. Les résultats montrent également l'apparition du molybdène 93, de l'uranium 235 et l'uranium 238, mais à des degrés moindres et à très long terme pour ces derniers.

Le SEA " dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface " indique un flux d'iode 129 sortant des LSF supérieur au flux sortant du Callovo-Oxfordien pendant 200.000 ans avec les données de la situation de référence et environ 50.000 ans avec celles de la situation enveloppe du SEN, mais à des niveaux inférieurs ou similaires au maxima de débit molaire par le Callovo-Oxfordien. Cette différence s'explique par les temps de transfert de l'iode dans le Callovo-Oxfordien plus petits dans la situation enveloppe. La quantité cumulée sur un million d'années d'iode 129 sortant des LSF reste toutefois limitée par rapport à l'inventaire initial total, à peine 1 % (avec les données de la situation de référence du SEN) ou 13 % (avec les données de la situation enveloppe du SEN).

L'architecture du stockage joue un rôle important en cas de dysfonctionnement des scellements, en limitant les écoulements d'eau dans les ouvrages du fait de sa borgnitude et en favorisant l'atténuation des débits molaires grâce à la longueur des ouvrages qui permet aux radionucléides qui migrent suivant les ouvrages de diffuser vers le Callovo-Oxfordien au fur et à mesure de leur transfert le long des ouvrages. Ce processus permet aux radionucléides mobiles issus du quartier MA-VL de bénéficier d'un facteur d'atténuation d'environ 5 ordres de grandeur entre l'entrée des galeries et la zone principale lorsque tous les scellements sont efficaces. Ce facteur d'atténuation est réduit à 3 ordres de grandeur en cas de dysfonctionnement des scellements des galeries ou des LSF et à 2 ordres de grandeur en cas de dysfonctionnement de tous les scellements.

Les évaluations réalisées avec les données de la situation de référence du SEN montrent que le flux instantané maximum d'iode 129 parvenant au toit du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages est multiplié par 40 en cas de dysfonctionnement des scellements de galerie ou des LSF et par 2500 en cas de dysfonctionnement de tous les scellements (cf. Figure 3.1 8). Ce flux reste toutefois 10 fois plus faible que le flux maximal passant par le Callovo-Oxfordien.

Avec les données de la situation enveloppe du SEN, par rapport à la situation de référence, les flux convectifs au sein des ouvrages sont plus importants et les débits molaires d'iode 129 sortant des LSF peuvent être multipliés par 250 en cas de dysfonctionnement de tous les scellements, sans toutefois excéder les flux maxima par le Callovo-Oxfordien. Ces résultats permettent de différencier l'apport respectif des scellements des LSF et des scellements de galerie : des scellements des LSF performants permettent de limiter les débits molaires par les ouvrages, et des scellements des galeries performants permettent d'assurer un retard important de la date d'occurrence du débit maximum en sortie des LSF.

Les résultats des évaluations montrent la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface, du fait notamment des caractéristiques du Callovo-Oxfordien.

Les effets d'un dysfonctionnement des scellements de galerie ou des liaisons surface-fond sont limités. Même en cas de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, l'évolution du régime hydraulique reste limitée par rapport à celle en scénario d'évolution normale, et le Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale.

Par conséquent, en termes d'impact radiologique (Tableau 3.1 7), la dose à l'exutoire du Dogger n'est pas affectée par le dysfonctionnement des scellements par l'interface.

La dose à l'exutoire " pompage dans le Barrois " est du même ordre que celle obtenue pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale.

3.2 Les SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA

3.2.1 Rappel des scénarios retenus

L'analyse des risques et incertitudes conduit à définir deux scénarios d'évolution altérée relatifs au dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA (cf. Tableau 1.7-2). Il répond ainsi au guide de sûreté de 2008 (1) qui recommande : ...« Dans les « situations altérées » à étudier, de prendre en compte d'éventuels « défaut d'un composant », notamment « l'existence de défauts de conditionnement de colis pourra être considérée afin de tenir compte des diverses incertitudes sur la qualité et le vieillissement des colis ».

Le scénario de défaillance de tous les conteneurs de stockage du quartier HA0 est retenu pour les évaluations quantitatives¹¹⁵.

Ce chapitre présente d'abord la description et conceptualisation du scénario puis présente les résultats des évaluations quantitatives des indicateurs retenus.

3.2.2 Description du scénario de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA

Ce SEA considère de manière conservatrice la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage du quartier HA0 en lien avec une corrosion oxydante due à la présence d'oxygène dans l'alvéole HA, notamment par la tête d'alvéole.

Compte-tenu des incertitudes sur la concentration en oxygène au sein de la partie utile de l'alvéole HA, il est considéré de manière conservatrice que l'ensemble des conteneurs de stockage du quartier HA0 est impacté.

Il est considéré de manière conventionnelle et enveloppe une perte d'étanchéité des conteneurs de stockage dès la fermeture complète du stockage conduisant à un relâchement des radionucléides dès cette date.

3.2.2.1 Effets induits de la perte d'étanchéité sur les modèles de relâchement et sur les caractéristiques de transport et rétention des radionucléides

La perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage des colis HA0 conduit à exposer la matrice vitreuse à des conditions d'environnement et de température entraînant une dégradation de ses performances de confinement.

¹¹⁵ Il est considéré enveloppe quant au nombre de conteneurs de stockage HA0 défaillants

A la date de perte d'étanchéité du conteneur de stockage, il est fait l'hypothèse que le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage (matériau de type argile/ciment) induit un environnement cimentaire qui influence la vitesse d'altération du verre. Par comparaison avec les modèles de relâchement retenus pour le SEN (milieu argileux), ces modèles et paramètres conduisent à des cinétiques de relâchement plus importantes. En effet :

- la prise en compte de la température dans les modèles de relâchement augmente les cinétiques d'altération compte tenu de la charge thermique à la date de perte d'étanchéité prématurée du conteneur de stockage ;
- l'effet du pH d'un milieu cimentaire sur les modèles de relâchement est pris en compte ;
- le taux de fracturation en milieu cimentaire classique est plus important qu'en milieu argileux compte tenu du risque de reprise d'altération ;
- l'atteinte d'un régime résiduel d'altération V_R (modèle $V_0 \rightarrow V_R$) n'est pas applicable à un milieu cimentaire.

Par ailleurs, la perte d'étanchéité prématurée du conteneur de stockage conduit à un relâchement des radionucléides dans un milieu présentant une charge de température plus important que celui du SEN et influant sur les paramètres de rétention et de transport des radionucléides. Des facteurs correctifs sont appliqués aux coefficients de diffusion, coefficients de partage et solubilités pour rendre compte des effets de la température dans le Callovo-Oxfordien.

3.2.2.2 Conceptualisation

L'ensemble des autres hypothèses et paramètres est pris équivalent à celui retenu dans le SEN. Ainsi, la conceptualisation physique du SEA est la même que celle associée au SEN en tenant compte des effets induits par la perte d'étanchéité des conteneurs de stockage. Une représentation schématique du SEA est présentée en Figure 3.2-1.

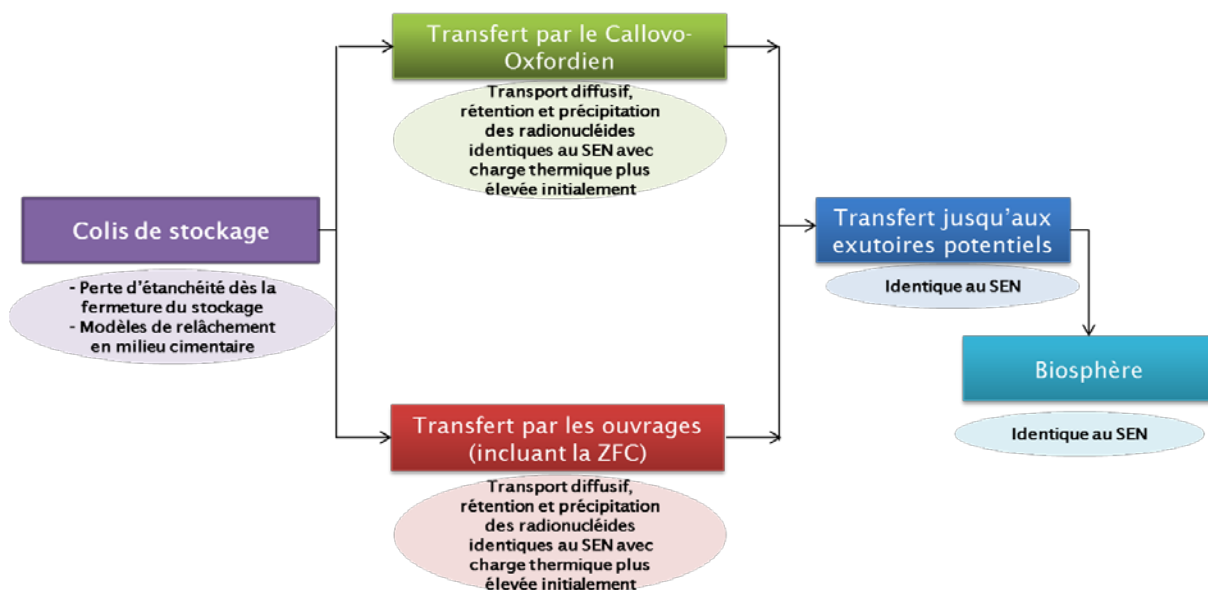


Figure 3.2-1 : Illustration schématique du SEA défaut de conteneur de stockage HA.

3.2.3 Traitement du SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA

3.2.3.1 Indicateurs

L'objectif étant d'évaluer la robustesse du système de stockage en cas de perte prématurée d'étanchéité des conteneurs de stockage HA0, seuls les indicateurs intermédiaires ont été quantifiés, à savoir :

- le débit molaire en entrée et sortie des composants ouvrages en considérant la voie de transfert par les ouvrages et ce jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien ;
- le débit molaire en sortie du toit du Callovo-Oxfordien, suivant la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien ;
- la date d'occurrence du maximum des sorties « ouvrages » et Callovo-Oxfordien (au toit et au mur).

3.2.3.2 Radionucléides retenus pour les évaluations

Les radionucléides retenus pour le SEA de défaillance des conteneurs de stockage HA0 sont les mêmes que ceux du SEN.

3.2.4 Résultats du SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA

3.2.4.1 Effets induits de la perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage sur les termes sources

La prise en compte d'un milieu cimentaire pour la dissolution du verre conduit à un relâchement des radionucléides sur une année¹¹⁶ (cf. Figure 3.2-2). Le terme source des déchets HA0 est considéré comme labile.

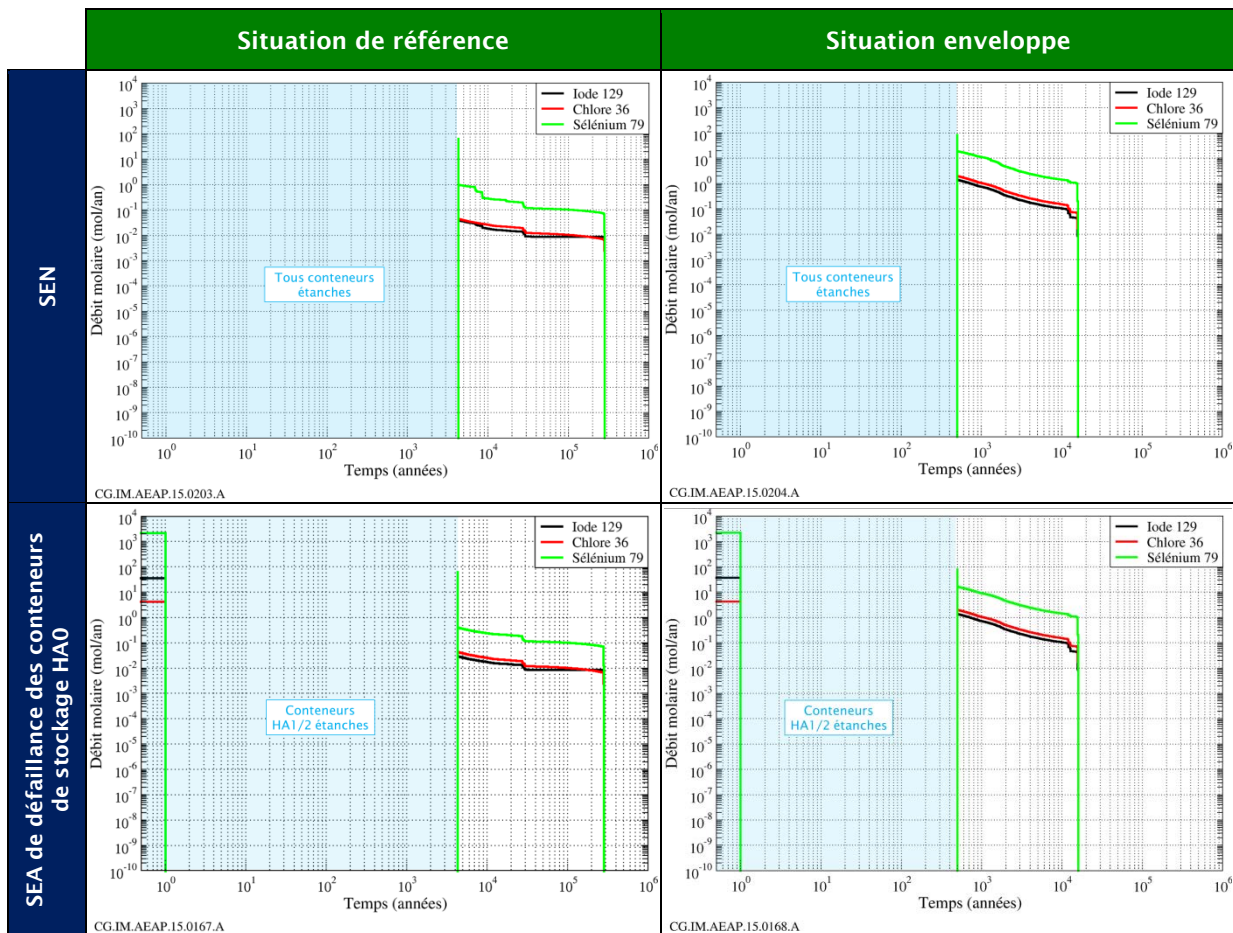


Figure 3.2-2 : SEN et SEA « défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0 ». Hypothèses de la situation de référence du SEN (gauche) et de situation « enveloppe » du SEN (droite) - Termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79

¹¹⁶ Pour le SEA construit sur les hypothèses de la situation de référence du SEN et pour le SEA construit sur les hypothèses de la situation enveloppe du SEN.

3.2.4.2 Effets induits sur le comportement hydraulique

L'augmentation temporaire de la perméabilité du fait de l'élévation de température ne modifie pas le schéma hydraulique d'écoulement au sein des ouvrages et dans le Callovo-Oxfordien. Les résultats sont identiques à ceux du SEN pour les deux situations (référence et enveloppe).

3.2.4.3 Évaluations quantitatives des transferts en regard de chacune des situations du SEN (référence et enveloppe)

Situation de référence

▪ Transfert par les ouvrages (galeries et liaisons surface-fond remblayées)

Les colis HA0 étant seuls défaillants, seule une faible part de l'activité initiale (1 % de l'inventaire initial total des colis HA) est relâchée de manière précoce. Les débits molaires arrivant dans les galeries, migrant par la voie ouvrage, et par le Callovo-Oxfordien sont identiques à ceux du SEN.

En effet, la charge thermique des quartiers HA0 est limitée de sorte qu'un relâchement prématuré et labile, a une influence négligeable sur les débits molaires (cf. Figure 3.2-3 et Tableau 3.2-1 pour l'iode 129 sur la base du SEN « référence » et Figure 3.2-3 pour l'iode 129 sur la base du SEN « enveloppe »).

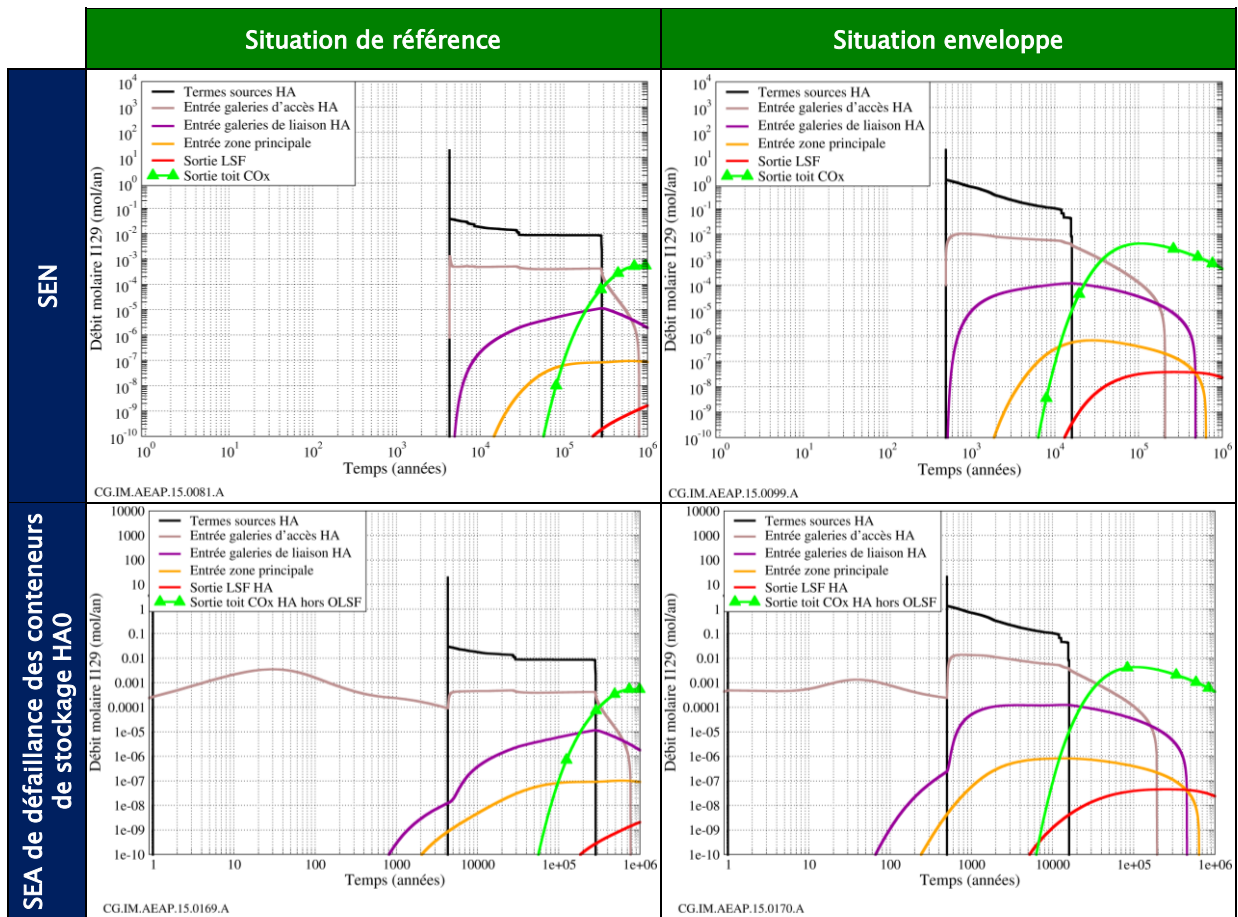


Figure 3.2-3 : SEA défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0. Hypothèses de la situation de référence du SEN (gauche) et de situation enveloppe du SEN (droite) -Historique de débit molaire d'iode 129 entrant dans les galeries, dans la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond.

A titre d'exemple, le maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des ouvrages de liaison surface-fond (au toit du Callovo-Oxfordien) est très inférieur (d'un facteur supérieur à 10^5) au maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie du toit du Callovo-Oxfordien au droit du stockage (Tableau 3.2-1 et Figure 3.2-3).

Tableau 3.2-1 : SEA défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0 - situation de « référence » : bilan de la quantité, d'iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total des déchets HA) relâchée à 1 million d'années entrant dans les galeries et la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Quantité d'iode 129 à 1 million d'années (en % de l'inventaire total initial des déchets HA)					
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone principale	Sortie par les LSF	Sortie par le toit du Callovo-Oxfordien
SEN	5.0 %	0,2 %	< 10 ⁻² %	< 10 ⁻⁴ %	11,3 %
SEA	5.0 %	0,2 %	< 10 ⁻² %	< 10 ⁻⁴ %	11,5 %

Quel que soit le composant (alvéole HA, quartier HA0), l'évaluation des indicateurs de performance montre que la voie de transfert principale est le Callovo-Oxfordien. Cette prépondérance s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries du fait de l'efficacité des scellements et donc des conditions de diffusion dominante dans et autour de l'alvéole HA et de la longueur pluri-décamétrique des alvéoles HA.

A l'échelle du quartier HA0, le transfert long et limité par diffusion des solutés dans les galeries permet une atténuation progressive du flux, du fait d'un échange important depuis les galeries vers le Callovo-Oxfordien.

Hors du quartier, une atténuation similaire supplémentaire est obtenue le long des galeries de la zone principale et des liaisons surface-fond.

Les temps de transfert dans les ouvrages masquent les effets d'un relâchement labile dès la perte d'étanchéité.

Les enseignements sont identiques pour le chlore 36 (cf. Tableau 3.2-2 ci-après).

Tableau 3.2-2 : SEA défaillance des conteneurs de stockage HA0 -situation de « référence » : bilan de la quantité de chlore 36 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) relâchée à un million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Quantité de chlore 36 à 1 million d'années (en % de l'inventaire total initial de déchets HA)					
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée zone principale	Sortant des LSF	Sortie toit du Callovo-Oxfordien
SEN	3,3 %	0,08 %	< 10 ⁻³ %	< 10 ⁻⁵ %	5,8 %
SEA	4,4 %	0,1 %	< 10 ⁻³ %	< 10 ⁻⁵ %	5,8 %

▪ Transfert dans le Callovo-Oxfordien

Les trois principaux radionucléides contributeurs sont l'iode-129, le chlore-36 et le sélénium-79. Les résultats sont identiques à ceux du SEN. En effet, l'inventaire mobilisé par la défaillance des conteneurs de stockage (quartier HA0) est très faible devant l'inventaire total des déchets HA et le débit molaire en iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien est piloté par l'inventaire des quartiers HA1/HA2.

Situation enveloppe

▪ **Transfert dans les ouvrages**

Les résultats conduisent aux mêmes conclusions que celles indiquées pour la situation de référence. La faible part de l'inventaire relâchée par les colis de déchets HA0, le débit molaire arrivant dans les galeries, migrant par la voie ouvrages, et migrant dans le Callovo-Oxfordien est identique à celui du SEN (Tableau 3.2-3).

Tableau 3.2-3 : SEA défaillance des conteneurs de stockage HA du quartier HA0 - situation enveloppe : bilan de la quantité en iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) relâchée à un million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

	Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial des quartiers HA)				
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée zone principale	Sortant des LSF	Sortie toit du Callovo-Oxfordien
SEN	5,8 %	0,4 %	< 10 ⁻² %	~ 10 ⁻³ %	61,1 %
SEA	5,8 %	0,4 %	<10 ⁻² %	~10 ⁻³ %	61,4 %

▪ **Transfert dans le Callovo-Oxfordien**

Pour rappel, en situation « enveloppe », le stockage est positionné dans le Callovo-Oxfordien de manière à préserver une garde supérieure saine de 50 mètres.

De même que pour la situation de référence, les résultats sont identiques à ceux du SEA. En effet, l'inventaire mobilisé par la défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0 est très faible devant l'inventaire total des déchets HA.

3.2.5 Enseignements du SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA

La défaillance prématurée des conteneurs de stockage du quartier HA0 entraînant le relâchement des radionucléides dès la phase après fermeture en milieu saturé (perte de la fonction « limiter le relâchement des substances radioactives») est sans effet sur les performances du système de stockage.

Les performances des scellements et du Callovo-Oxfordien apportent les lignes de défense nécessaires pour satisfaire les fonctions de sûreté « s'opposer aux circulations d'eau », « retarder et atténuer la migration des substances radioactives ».

Les résultats sont identiques entre le scénario d'évolution normale et le scénario d'évolution altérée de défaillance prématurée des conteneurs de stockage du quartier HA0.

4

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire

4.1	<i>Identification des scénarios d'intrusion humaine involontaire</i>	334
4.2	<i>Le SEA de forage exploratoire au Dogger</i>	341
4.3	<i>Le scénario de prélèvement de carottes</i>	347
4.4	<i>Le scénario « What-if » d'intrusion humaine</i>	352

4.1 Identification des scénarios d'intrusion humaine involontaire

4.1.1 Démarche méthodologique

Dans le contexte géologique de la ZIRA, et compte tenu de la profondeur d'implantation de Cigéo, le seul mode d'intrusion involontaire pris en considération est un forage réalisé depuis la surface. Un examen des différentes « situations de forage » envisageables est d'abord mené au regard de trois éléments.

- objectif du forage et formation géologique cible : l'objectif technique du forage (exploration, exploitation d'eaux souterraines, géothermie, par exemple) et la formation géologique cible déterminent la profondeur visée et les diamètres du forage ;
- localisation du forage : la localisation du forage par rapport à l'architecture du stockage (alvéoles de stockage ou autres ouvrages) et par rapport au contexte hydrogéologique détermine les types de conséquences possibles en termes d'altération du fonctionnement du système de stockage et de modification des conditions de migration des radionucléides et des toxiques chimiques ;
- les éléments temporels : les phases de vie du forage (réalisation, exploitation puis abandon), en lien avec la situation de resaturation et l'évolution des composants du stockage déterminent les types d'interactions possibles entre le forage et le système de stockage, ainsi que l'activité des radionucléides susceptibles d'être mobilisés.

Une première analyse conduit à conserver les situations physiquement possibles et susceptibles d'avoir des conséquences en termes d'impact. Ces situations sont évaluées, de manière relative, au plan de la vraisemblance et des impacts potentiels. Un nombre réduit de scénarios « enveloppes » à quantifier est retenu *in fine*.

Le principe de complétude qui sous-tend la démarche ci-dessus est à mettre en regard du contexte géologique et hydrogéologique de la ZIRA et la profondeur prévisionnelle d'implantation du stockage, qui contribuent à réduire la probabilité de réalisation de forages profonds. Par ailleurs, la durée de préservation de la mémoire du stockage évaluée à 500 ans permet la décroissance des radionucléides à vie courte avant l'occurrence éventuelle d'une intrusion.

4.1.2 Revue des « situations de forage »

4.1.2.1 Objectif des forages et formations cibles

La réalisation d'un forage répond à un objectif déterminé, conditionné par la connaissance acquise sur la géologie locale au moment de la prise de décision. Le forage vise une formation cible dont la profondeur connue ou estimée, en combinaison avec la finalité du forage envisagé, déterminent la technique de creusement à utiliser et la coupe technique prévisionnelle de l'ouvrage (diamètres de foration, diamètres des tubages et hauteurs de cimentations, notamment).

Une partie des connaissances géologiques disponibles aujourd'hui sur la ZIRA et son secteur pourra avoir été perdue au moment de la réalisation future d'un forage ; on considère cependant que les motivations techniques qui régissent un projet de forage resteront valables dans le futur. Ceci tend à réduire la probabilité d'occurrence d'un forage d'exploitation sur des cibles pour lesquelles il serait déjà établi qu'elles ne constituent pas une ressource exceptionnelle en regard des ressources disponibles ailleurs.

En regard des différences de diamètre de foration et des équipements tubulaires d'un forage, le diamètre de foration final détermine celui qui sera utilisé à la profondeur du stockage. Sur la base des pratiques actuelles, un diamètre de 8"1/2 (216 mm) à la profondeur du stockage serait suffisant pour une simple reconnaissance géologique du Dogger.

Pour un forage d'exploitation d'une ressource géothermique à 2000 m de profondeur, un diamètre de foration plus important serait retenu, de l'ordre de 17"1/2 ou 445 mm à la profondeur de 500 m. Ce diamètre est considéré comme la borne supérieure pour tout forage à la profondeur du stockage.

La Figure 4.1-1 schématise les profondeurs des formations géologiques depuis la surface (calcaires du Barrois d'âge Tithonien) jusqu'au socle (Stéphanien) sur la ZIRA.

Pile sédimentaire au droit de la ZIRA

Profondeur maximale indicative de la base des formations

Tithonien	70 m
Kimméridgien	180 m
Oxfordien	450 m
Callovo-Oxfordien	600 m
Dogger	850 m
Lias	1300 m
Trias	(formations salifères 1700 m) 2000 m
Permien	3800 m
Stéphanien	Supérieure à 5800 m

N.B. : Représentation schématisée sans échelles.

Les épaisseurs relatives des couches, leur variabilité et les pendages ne sont pas figurés

C.IM.ASAF.16.0007.B

Figure 4.1-1 : Représentation schématique des profondeurs des formations géologiques sur la ZIRA (profondeurs indicatives de la base des formations)

Le Tithonien et l'Oxfordien correspondent à des « actions humaines » sans intrusion. Le Kimméridgien n'est pas considéré comme une cible potentielle. Les forages correspondant aux « cibles » Callovo-Oxfordien à Stéphanien peuvent avoir un caractère intrusif selon leur positionnement en surface par rapport à la projection verticale de l'architecture « fond » du stockage.

L'analyse des « cibles » potentielles conduit aux observations suivantes :

- les « cibles » Calcaires du Barrois (Tithonien), niveaux perméables de l'Oxfordien, et niveaux perméables du Dogger, correspondraient à un objectif d'investigation d'une ressource en eau supposée, ou d'exploitation de cette ressource en eau lorsqu'elle est avérée ;
- pour la « cible » Callovo-Oxfordien, la motivation de forage supposée serait la recherche scientifique. Ce type d'investigation correspond à des diamètres de foration petits mais il est postulé qu'il pourrait s'accompagner du prélèvement de carottes ;
- les « cibles » Permien et Stéphanien correspondraient à des investigations liées à des ressources en hydrocarbures. Les connaissances actuelles disponibles concernant les potentialités de ressources en hydrocarbures conventionnels et non conventionnels écartent la possibilité d'une exploitation au droit de la ZIRA ;
- les « cibles » Trias (pour partie) et Permien, correspondraient à une perspective d'utilisation de l'énergie géothermique (géothermie haute enthalpie) :
 - ✓ pour ce qui concerne le Trias (grès du Buntsandstein), le forage profond TAPPS et les diverses analyses menées par l'Andra et des entités indépendantes, convergent sur le fait que cette cible ne présentent pas de caractéristiques locales exceptionnelles, notamment en termes de température ;
 - ✓ il n'y a pas d'informations précises quant aux caractéristiques hydrauliques et thermiques du Permien dans la perspective d'une exploitation géothermique. En tout état cause, les

conséquences éventuelles de forages atteignant le Permien sur le système de stockage Cigéo seraient comparables à celles évaluées pour un dispositif d'exploitation au Trias. Le même raisonnement s'applique à une éventuelle exploitation du sel dans le Trias supérieur.

Les éléments cités plus haut rendent peu vraisemblable une exploitation géothermique du Trias sur la ZIRA qui nécessiterait par ailleurs une consommation locale de l'énergie thermique éventuellement produite. Il est néanmoins retenu de traiter les situations comportant un forage à objectif d'exploitation géothermique mais de les classer en « *What-if* ».

4.1.2.2 Localisation du forage par rapport au système de stockage

Le Tableau 4.1-1 présente les différentes localisations de forages susceptibles de correspondre à une perturbation du système de stockage ou à l'interception de panaches de radionucléides.

Tableau 4.1-1 : *Localisations possibles des forages par rapport au système de stockage et aux panaches de radionucléides*

Localisations possibles des forages par rapport au système de stockage Cigéo.			
Type de localisation	Description	Commentaires	
L1	Au droit d'alvéoles de stockage de colis de déchets : - tunnels MAVL - micro-tunnels HA.	Le forage pénètre dans un alvéole de stockage, voire dans les colis; dans le second cas l'extraction de carottes contenant des déchets peut être envisagée. Selon les cas, le forage est poursuivi à plus grande profondeur au travers de la garde inférieure, ou il est arrêté à la cote du stockage.	Situation d'intrusion au sens strict.
L2	Au droit de galeries d'accès aux alvéoles de stockage des déchets, dans les quartiers.	Le forage pénètre dans une galerie d'accès aux alvéoles de stockage. Selon les cas, le forage est poursuivi à plus grande profondeur au travers de la garde inférieure, ou il est arrêté à la cote du stockage.	- Situation d'intrusion au sens strict. - Seules les galeries d'accès aux micro-tunnels HA seront traitées; l'intrusion dans un tunnel MA-VL "couvre" l'intrusion dans toute galerie du quartier MA-VL.
L3	Au travers de l'architecture, sans contact avec les ouvrages ni avec leur zone de fracturation connectée.	Le forage dépasse la profondeur du stockage, en passant à l'intérieur du périmètre du stockage, mais sans toucher directement les ouvrages.	- Le cas de l'interception de l'EDZ est "couvert" par le cas d'un forage touchant les composants ouvrages et y pénétrant. (cas L1 et L2) - Les situations sans contact sont considérées conventionnellement dans le cadre des intrusions. En pratique elles n'auront aucun effet négatif sur le fonctionnement du stockage.
L4	Dans le panache de radionucléides issu du stockage et migrant dans les formations de l'Oxfordien.	- Le forage est situé dans le panache de radionucléides issu du stockage c'est à dire au droit de la projection verticale du stockage ou en aval hydraulique.	- Situation de type "action humaine" puisque ni le Callovo-Oxfordien ni le stockage ne sont atteints.
L5	Dans le panache de radionucléides issu du stockage et migrant dans les formations du Dogger	- Le forage est situé dans le panache de radionucléides issu du stockage et migrant dans les horizons sous-jacents du Dogger. - L'axe de plus forte concentration en radionucléides commence en aval immédiat du stockage et se prolonge dans la direction des écoulements hydrauliques du Dogger qui conduisent vers la zone de fracturation diffuse avant de s'infléchir vers le Sud.	- La situation peut correspondre à une intrusion humaine si le forage est réalisé à l'intérieur de la projection du stockage. - Il est considéré que les potentialités au droit de la ZIRA n'y justifient pas un forage d'exploitation effective des eaux souterraines pour l'alimentation.
L6	Dans la zone de fracturation située à l'ouest de la ZIRA (Dogger)	Le forage se situe dans la zone de fracturation, située à l'Ouest et au Sud-Ouest de la ZIRA, en raison d'une meilleure transmissivité. Sa profondeur est supposée suffisante pour capter l'eau des formations perméables du Dogger.	- Situation de type "action humaine". - Cet exutoire est du même type que celui retenu comme exutoire "Dogger" dans le cadre du SEN.
L7	Dans la zone de fracturation de la Mame (Oxfordien)	Le forage serait un point de prélèvement au droit de la zone de fracturation de la vallée de la Mame qui constitue un exutoire pour certains écoulements de l'Oxfordien.	- Pour mémoire. Cet exutoire naturel n'est pas susceptible d'être atteint par les radionucléides issu du stockage au cours du premier million d'années après fermeture.
L8	Au droit ou à proximité de l'exutoire naturel du Dogger	Le forage, voire le puits de faible profondeur, représente un point de prélèvement au droit ou à proximité de l'exutoire naturel du Dogger. Les simulations géoprospectives montrent un déplacement de cet exutoire vers l'Est vers 400 000 ans.	- Situation de type "action humaine". - Cette situation est "couverte" par la localisation L6 qui est un point intermédiaire sur le trajet de migration entre le stockage et l'exutoire naturel L8.

Le processus d'analyse conduit à retenir les localisations suivantes :

- les localisations L1 et L2 correspondent à une intrusion effective dans le stockage. Elles peuvent induire un impact immédiat en cas de remontée de déchet ou de court-circuit des gardes verticales susceptibles de constituer des voies de migration des radionucléides ;

- la localisation L4 correspond à une hypothèse d'exploitation des niveaux les plus perméables de l'Oxfordien ; elle est jugée très peu probable compte tenu de leur très faible productivité et en conséquence relève d'un « *What-if* » ;
- la localisation L6 correspond à un exutoire du Dogger comparable à celui dans la zone de fracturation diffuse¹¹⁷ retenu en SEN.

Les autres localisations ne sont pas retenues :

- L3 en raison de l'absence de conséquences bien que le plan du stockage soit traversé ;
- L5 du fait de la salinité et de la profondeur des eaux du Dogger qui ne justifient pas une exploitation locale ;
- L7 en raison des cheminements très longs et du choix de L4 situé plus en amont ;
- L8 en raison du choix de l'exutoire du Dogger en L6.

4.1.2.3 Incidence des phases de vie du forage

Phase de réalisation

Il s'agit de la phase au cours de laquelle se produira, le cas échéant, l'interception des ouvrages de stockage et les impacts immédiats associés. La première date d'occurrence considérée pour la réalisation d'un forage intrusif est 500 ans après la fermeture du stockage : elle correspond à la durée minimale de conservation de la mémoire du stockage indiquée par le Guide de sûreté de l'ASN relatif au stockage en formation géologique (1).

Dans le cas d'un forage intrusif, il ne peut être exclu, sur le long terme, qu'un forage puisse traverser le stockage sans qu'aucun indice de sa présence ne soit relevé, particulièrement si le niveau cible est profond et que le Callovo-Oxfordien ne représente a priori qu'un horizon banal à passer.

Phase d'exploitation (le cas échéant)

La réalisation du forage pourra être suivie d'une phase d'exploitation par pompage si les caractéristiques de l'horizon atteint le justifient.

Des situations correspondant à des ressources trop limitées pour permettre une exploitation sur une certaine d'années au minimum ne sont pas prises en considération dans cette analyse.

Pendant l'exploitation, le caractère intrusif ou non des forages dans le Callovo-Oxfordien n'est pas déterminant, car un forage visant les niveaux aquifères profonds (Trias par exemple) serait isolé du Callovo-Oxfordien, et donc du stockage, par un dispositif de tubage(s) continu. Dans ces conditions, les conséquences d'une phase d'exploitation sont un prélèvement d'eau des formations exploitées contenant des radionucléides issus du stockage.

Abandon du forage

Dans tous les cas, les forages sont abandonnés, soit immédiatement après des tests, soit en fin d'exploitation. Les bonnes pratiques prescrivent que les forages soient scellés, en général par injection d'un coulis d'obturation, afin d'interdire la communication entre niveaux aquifères différents.

De manière pénalisante, et pour tenir compte des grandes échelles de temps pendant lesquelles le système de stockage doit fonctionner, il est supposé que les tubages éventuels sont rapidement corrodés et que les obturations sont dégradées. Le diamètre du forage est supposé inchangé pendant toute la durée de l'évaluation ; un milieu à perméabilité équivalente à celle d'un sable est considéré occuper la totalité du diamètre excavé.

Les forages intrusifs abandonnés peuvent ainsi constituer un court-circuit local des gardes supérieure et inférieure de Callovo-Oxfordien. Un flux d'eau peut s'établir en fonction de la différence de charge hydraulique existant entre les encaissants supérieurs, le stockage et les encaissants inférieurs.

¹¹⁷ La « Zone de Fracturation Diffuse » est entendue au sens large. Elle comprend la vallée de la Marne au Nord de Joinville et la zone de fracturation de Poisson-Brouthières-Soulaincourt.

Un mode de fonctionnement particulier sous forme d'un relais entre un forage abandonné et un forage d'exploitation actif peut être envisagé. Il convient dans ce cas de faire mention d'une vraisemblance moindre compte tenu de la combinaison d'événements qu'il représente (nécessité d'une certaine proximité entre les deux ouvrages et positionnement relatif favorable au transfert hydraulique).

4.1.2.4 État de resaturation du stockage

Pendant le transitoire de resaturation du stockage, certaines périodes peuvent correspondre à la présence de gaz exprimés et dissous dans les ouvrages du stockage. L'arrivée d'un outil de forage pourrait s'accompagner de différents phénomènes : perte du fluide de circulation, éjection d'hydrogène et d'eau sous forme d'aérosols par exemple. Ces situations feront ultérieurement l'objet d'une analyse spécifique.

Le Tableau 4.1-2 résume les quatre situations temporelles envisageables par combinaison des phases de vie du forage et de l'état de resaturation du stockage.

Tableau 4.1-2 : *Situations de forage en fonctions des phases de vie du forage et en fonction de l'état de resaturation du stockage.*

Intrusions en termes de phases de vie de l'ouvrage et d'état de saturation du stockage		
Phase de vie du forage	Description de la situation	Commentaire
V1 Réalisation du forage pendant le transitoire hydraulique gaz du stockage	- La période de réalisation du forage et des tests associés est en tout état de cause postérieure aux 500 ans après fermeture correspondant à la préservation de la mémoire du stockage. - Elle coïncide avec la phase transitoire hydraulique gaz de resaturation du stockage. En cas d'interception du stockage, il est supposé qu'une phase gaz exprimée est présente.	- Dans cette situation, la présence de vides, et potentiellement de gaz sous pressions, est susceptible de perturber les opérations de forage (perte de fluide de circulation, remontée brutale de gaz et d'eau ...) et en tout état de cause d'alerter le foreur. - Une fois le dégazage réalisé, le forage est susceptible d'être poursuivi jusqu'à son objectif (Cf. V2) ou abandonné (Cf. V4)
V2 Réalisation du forage après le transitoire hydraulique gaz du stockage	La période de réalisation du forage et des tests associés se situe après le transitoire de resaturation du stockage. En cas d'interception du stockage, et plus cette interception sera tardive, il est possible que la traversée du stockage ne soit pas perçue.	- Dans le cas où le stockage serait touché tardivement, l'absence de gaz et de surpressions, pourrait conduire à la traversée des ouvrages du stockage sans que le foreur soit alerté. - Un blocage du train de tiges au passage du stockage est également possible, et ce d'autant plus que l'intrusion serait précoce.
V3 Exploitation du forage	Période d'exploitation prolongée (d'ordre séculaire), ou conventionnellement permanente, du forage.	- Dans ce cas, il est supposé que les ressources rencontrées ont été suffisantes pour justifier une exploitation au moins d'ordre séculaire du forage. - Dans le cas de forages intrusifs, l'exploitation éventuelle concernerait des niveaux aquifères dans les encaissants inférieurs. Dans cette situation il y aurait un tubage et une cimentation au droit du Callovo-Oxfordien qui interdirait toute communication.
V4 Forage abandonné	Forage abandonné, sans fermeture particulière, après fin de la reconnaissance, des essais, et de l'exploitation.	- Indépendamment des phases antérieures (test ou non, exploitation ou non) le forage est supposé abandonné. Il est supposé non étanche jusqu'à la profondeur effectivement atteinte.

4.1.3 Sélection des scénarios retenus

L'examen des situations impliquant des forages est réalisé en considérant un niveau technologique futur comparable à l'actuel pour ce qui concerne les méthodologies de creusement et d'équipement des forages. Indépendamment du niveau de connaissance de la géologie locale qui sera disponible au moment de la réalisation d'un forage, il est considéré que les raisonnements scientifiques et les stratégies liés aux décisions de forer seront les mêmes qu'aujourd'hui.

En conséquence :

- un forage de reconnaissance en petit diamètre sera souvent réalisé en premier lieu pour vérifier la capacité d'exploitation d'une cible mal connue ;

- les constatations qui ont déjà pu être faites aujourd'hui (par exemple la faible épaisseur des « schistes carton » ou la mauvaise productivité de l'Oxfordien calcaire) seront « redécouvertes » à l'avenir, même dans le cas d'une perte ou diminution des connaissances par rapport au niveau actuel.

Un classement des situations de forage selon deux niveaux de vraisemblance est proposé :

- niveau de vraisemblance faible : il correspond à des situations peu probables sur la durée de vie du stockage. Leur traitement est mené dans le cadre d'un scénario de type évolution altérée dédié (SEA) ;
- niveau de vraisemblance très faible : il correspond à des situations très peu probables, ou combinant des circonstances peu probables. Leur traitement est mené dans le cadre de scénarios de type « *What-if* » utilisés pour vérifier la robustesse du système de stockage.

Compte tenu de la très longue période de fonctionnement attendue du stockage Cigéo, la question du nombre de forages intrusifs à considérer peut se poser au titre de chaque opération de forage mais aussi en termes d'opérations successives éventuelles. Pour ce qui concerne les forages directement exploités, ou les forages abandonnés en relais avec un forage exploité, l'hypothèse de forages multiples n'augmente pas le niveau de l'impact puisqu'il y aurait dilution de la contamination en raison de la compétition se produisant entre les pompages.

A ce stade, on retient un seul forage. La prise en compte de plusieurs forages abandonnés sera évaluée pour la DAC.

L'analyse de l'ensemble des situations impliquant des forages conduit à une liste restreinte de six scénarios considérés comme étant « enveloppes » au plan des impacts potentiels (Cf. Figure 4.1-2).

4.1.3.1 Situations retenues au titre de SEA d'intrusion humaine involontaire

Situation ① SIHFor-1 (localisation L1) - Scénario d'exposition à des carottes contenant des déchets

Les impacts considérés sont exclusivement les impacts immédiats ; les autres conséquences possibles de la réalisation du forage, comme celles liées à la perturbation locale de la garde supérieure du stockage sont couvertes par d'autres scénarios dédiés.

Situation ② SIHFor-2c (localisations L1 et L2) - Scénario impliquant un forage d'exploration au Dogger abandonné à la cote du stockage

Le forage de reconnaissance est abandonné à la profondeur du stockage et constitue un court-circuit de la garde supérieure de Callovo-Oxfordien. Un relais hydraulique fonctionne avec un forage d'exploitation des niveaux aquifères du Barrois (exutoire « Barrois » du même type que celui du SEN) - La nécessaire combinaison d'une faible distance entre les forages et d'une « connexion hydraulique » favorable confèrent une faible vraisemblance à cette situation.

Situation ③ SIHFor-2b (localisations L1 et L2) - Scénario impliquant un forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle

Le forage de reconnaissance atteint sa cote prévisionnelle. Il constitue un court-circuit local des gardes supérieures et inférieures de Callovo-Oxfordien et induit une possibilité de migration des radionucléides vers les exutoires du Dogger.

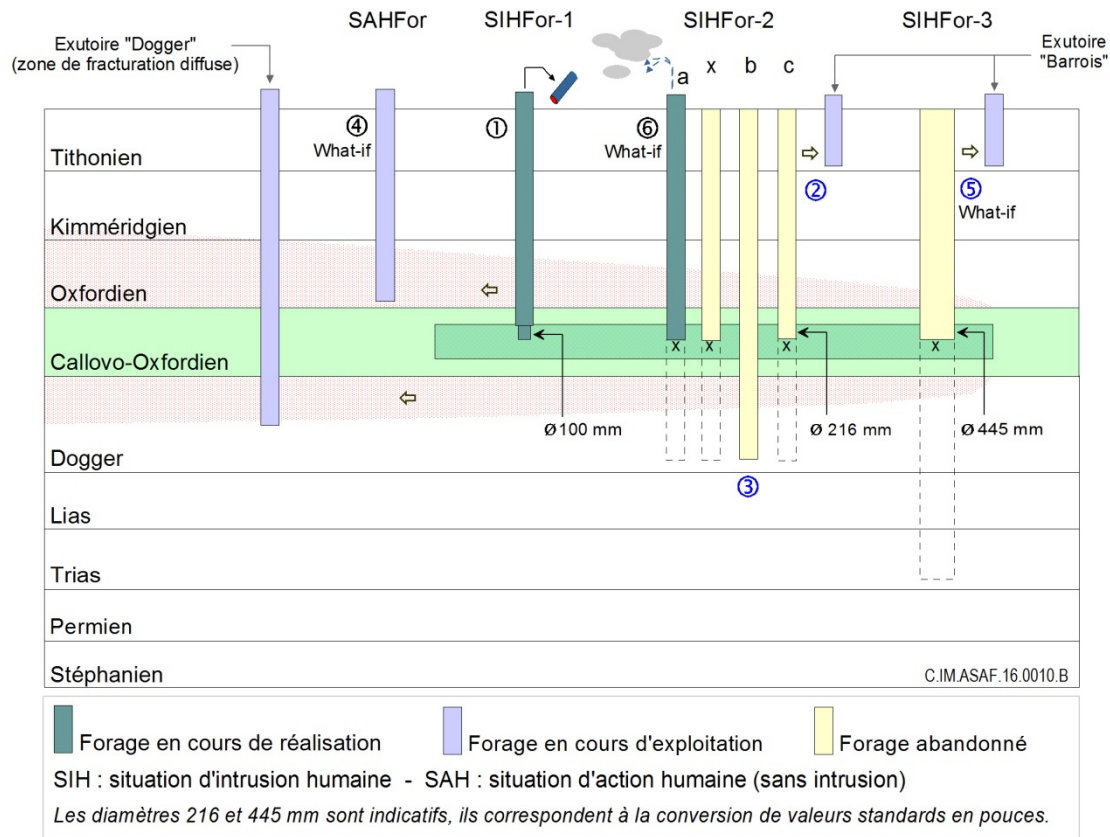


Figure 4.1-2 : Représentation schématique des situations de forage « enveloppes » retenues pour l'évaluation de sûreté après fermeture.

4.1.3.2 Situations retenues au titre de scénarios « What-if »

Situation ④ SAHFor-1 (localisation L4) – Scénario « What-if » d'exploitation d'un forage captant les horizons perméables de l'Oxfordien calcaire.

Le forage est supposé exploiter les niveaux les plus perméables de l'Oxfordien calcaire au droit du stockage. Les conditions défavorables en termes de profondeur et de débit disponible par rapport à la disponibilité d'une ressource plus accessible et abondante dans le Barrois pendant une longue période après fermeture conduisent à proposer le traitement de cette situation dans le cadre d'un scénario « What-if ».

Situation ⑤ SIHFor-3 (localisations L1 et L2) - Scénario impliquant un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage.

Le forage constitue un court-circuit de la garde supérieure de Callovo-Oxfordien. Un relais hydraulique fonctionne avec un forage d'exploitation du Barrois. La vraisemblance d'une exploitation géothermique du Trias ou du Permien est jugée « très faible » au vu du contexte géologique connu. L'hypothèse d'un arrêt du forage au droit du stockage est majorante en termes de conséquences hydrauliques.

Situation ⑥ SIHFor-2a (localisations L1 et L2) - Scénario de dégazage d'un alvéole MA-VL ou d'une galerie HA pendant le transitoire de resaturation.

En fonction des circonstances, les impacts peuvent être immédiats et de courte durée au moment du contact avec le stockage, ou à plus longue échéance en cas d'éjection d'eau contenant des radionucléides.

4.1.3.3 Quantifications proposées à l'étape dossier d'option de sûreté

Trois scénarios sont traités dans le présent dossier :

- le SEA SIHFor-1 (situation ①) d'exposition à des carottes prélevées contenant des déchets : il permet également d'évaluer la dangerosité résiduelle des déchets stockés ;
- le « What-if » SIHFor-3 (situation ⑤) impliquant un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage : il permet d'évaluer les conséquences d'un court-circuit local de la garde supérieure;
- et le SEA SIHFor-2b (situation ③) impliquant un forage de reconnaissance abandonné à sa cote prévisionnelle dans le Dogger : il permet une évaluation des impacts possibles sur l'exutoire « Dogger ».

Le « *What-if* » SIHFor-3 (situation ⑤) a été préféré à ce stade au SEA SIHFor-2c (situation ②) en raison des impacts majorants qu'il est susceptible de fournir du fait d'un diamètre de forage de 445 mm au lieu de 216 mm.

Les scénarios correspondant aux situations 2 (« couverte » par la situation 5), 4 et 6 feront l'objet d'une évaluation à l'échéance de la DAC.

4.2 Le SEA de forage exploratoire au Dogger

4.2.1 Traitement du scénario

Horizon géologique cible - Objectifs et caractéristiques du forage

Le scénario SIHFor-2b (situation ③) est la situation d'intrusion retenue au titre des transferts possibles par les niveaux aquifères du Dogger. L'exutoire concerné est celui retenu pour le SEN.

La situation décrite résulte de la réalisation d'un forage d'exploration du Dogger jusqu'à sa cote cible. Les faibles caractéristiques de l'aquifère du Dogger au droit de la ZIRA sont considérées décourager toute exploitation de cet aquifère pour la production d'eau potable ou pour l'irrigation ; elles justifient un diamètre limité à 216 mm¹¹⁸ dans sa traversée du Callovo-Oxfordien. Le forage est supposé atteindre les niveaux perméables du Dogger qui sont en continuité hydraulique avec la zone de fracturation diffuse située à l'Ouest de la ZIRA.

Dans une logique de prise en compte de valeurs conservatives en situation « enveloppe », il est retenu par convention une perméabilité de 10^{-5} m/s du forage abandonné.

¹¹⁸ Valeur indicative résultant de la conversion du diamètre « standard » 8,5 pouces.

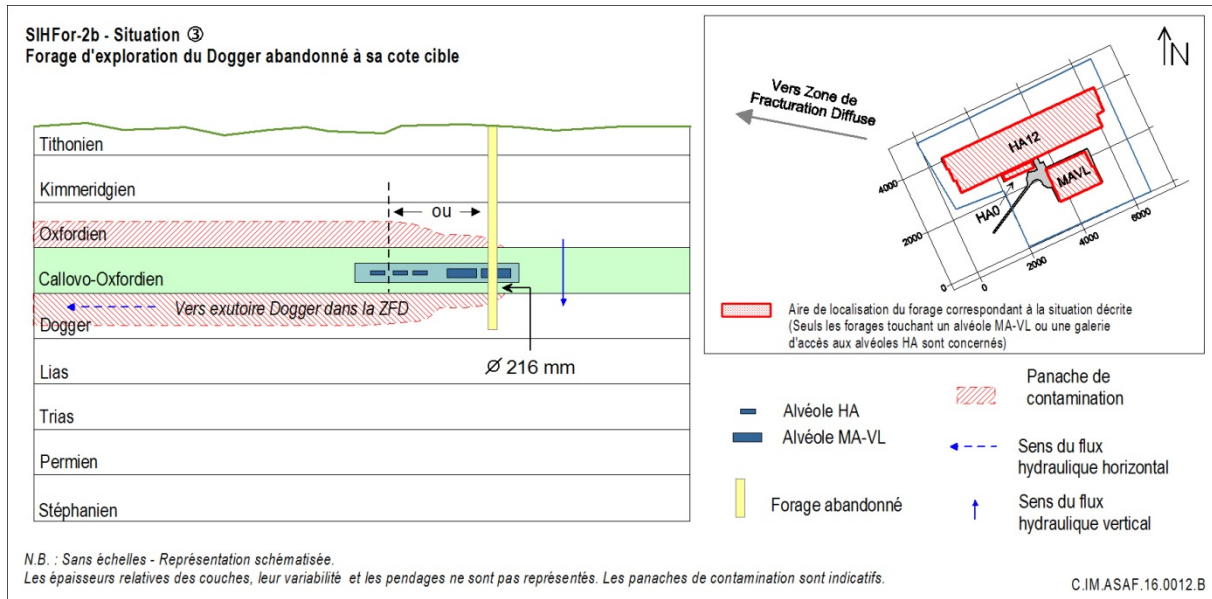


Figure 4.2-1 : Représentation schématique du scénario SIHFor-2b - « Forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle ».

Localisation du forage par rapport aux ouvrages de stockage

La recherche de situations « enveloppe » conduit à identifier le positionnement du forage intrusif le plus pénalisant en regard de la localisation de l'inventaire dans le stockage. Les cas des colis de déchets HA et des colis de déchets MA-VL sont traités séparément.

Pour les colis de déchets HA, le forage touche une galerie d'accès aux alvéoles dans le secteur de plus forte « activité » en iode 129 ramenée à la surface du fait de la distance d'influence d'un forage, soit le quartier HA1 (Cf. Figure 4.2-2). Cette localisation permet de « couvrir » le cas d'une intrusion dans les quartiers HA2 et HAO.

Pour les déchets MA-VL, en cohérence avec le mode de redistribution des familles utilisé pour le SEN, l'alvéole touchée par le forage est le n°5. Dans le cas du présent scénario d'intrusion, et afin de limiter le nombre d'évaluations, les activités déterminées par les redistributions « pilotées » par chacun des radionucléides sont considérées simultanément.

Ce choix est majorant à deux titres :

- pour chaque radionucléide, l'alvéole atteinte contient la plus forte activité possible compte tenu des seules règles de co-stockage physico-chimique et géométrique des colis de stockage ;
- les activités sont supposées présentes simultanément dans le même alvéole du quartier MA-VL.

A l'intérieur de chaque alvéole MA-VL, les inventaires des différentes familles de colis de déchets sont supposés répartis de façon homogène pour tous les radionucléides. Les cas échéant, il est distingué comme en SEN « enveloppe » une fraction labile et une cinétique de relâchement pour la part d'activité concernée.

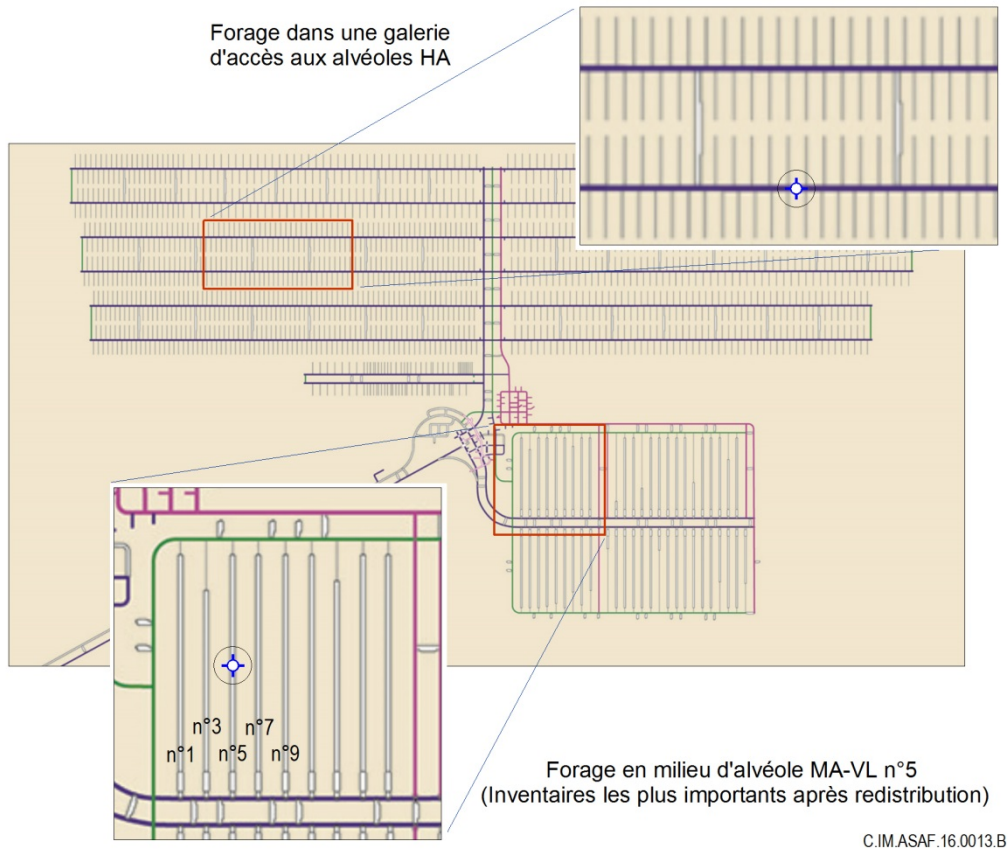


Figure 4.2-2 : Positionnement des forages abandonnés dans les quartiers MA-VL et HA1

Deux situations sont évaluées afin « d'encadrer » le domaine de performance envisagé pour les ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL :

- une situation dans laquelle les alvéoles MA-VL sont fermés par un matériau de type « remblai » ;
- une situation dans laquelle chaque alvéole est fermée par un scellement à ses deux extrémités.

Date de l'intrusion et prise en compte des radionucléides

Le forage intrusif fonctionne dès 500 ans, puis de manière permanente dès 500 ans, comme un drain hydraulique entre l'Oxfordien, le stockage et le Dogger, dont le moteur est une différence de charge hydraulique entre l'Oxfordien et le Dogger.

L'ensemble des radionucléides de période suffisamment longue et susceptibles d'être disponibles dans l'eau des alvéoles est considéré borné par les limites de concentration à saturation. Les phénomènes d'atténuation susceptibles de se produire au cours de la migration des radionucléides vers le forage sont pris en compte. L'Annexe 12 : présente la liste des radionucléides retenus pour le calcul.

Dans le cas du forage intrusif dans un quartier MA-VL, l'eau contenant des radionucléides est directement soutirée dans l'alvéole MA-VL atteint. Dans le cas du forage dans un quartier HA, la migration des radionucléides sur quelques dizaines de mètres de galeries au minimum contribue à une atténuation des radionucléides concernés par transfert vers le Callovo-Oxfordien, dans les limites des paramètres de la situation « enveloppe » du SEN.

Types d'impacts et groupes de référence hypothétiques

L'exutoire susceptible d'être affecté dans cette situation est un forage au Dogger dans la zone de fracturation diffuse comme pour le SEN. Le groupe de référence hypothétique et les modes d'atteinte sont identiques à ceux du SEN. Le débit de dilution pris en compte à l'exutoire est de 100 litres par minute.

Paramètres – Indicateurs

Les hypothèses et les données de base retenues (hors celles liées à l'intrusion) sont celles de la situation enveloppe du SEN. En particulier, le positionnement « inférieur » correspondant à 50 mètres de garde saine sous les ouvrages est considéré.

Le scénario d'intrusion est combiné à la prise en compte d'un gradient hydraulique vertical dans le Callovo-Oxfordien descendants et dont la valeur correspond au maximum de 0,05 mètres par mètre constaté sur la ZIRA sur le million d'années. Il est appliqué de manière uniforme et pérenne sur le million d'années. Les flux molaires sortant du forage intrusif sont directement « injectés » dans les niveaux perméables du Dogger.

L'indicateur final est la dose à l'exutoire « Dogger » situé dans la zone de fracturation diffuse pour chaque radionucléide. Des indicateurs intermédiaires comme les débits hydrauliques liés à l'intrusion et le débit molaire des radionucléides en sortie du forage sont évalués.

Conceptualisation numérique

Compte tenu de l'exutoire retenu et de la nécessité de représenter plusieurs alvéoles MA-VL et HA du fait d'un rayon d'influence du forage potentiellement supérieure à un alvéole, la conceptualisation diffère de celle du SEN. Il est considéré un seul compartiment de calcul à l'échelle du stockage. Celui-ci comprend les différentes zones de stockage avec l'ensemble des alvéoles (HA1-HA2, HA0 et MA-VL), le système de galeries, les ouvrages de fermeture des galeries, les ouvrages de liaison surface-fond et leurs ouvrages de fermeture, ainsi que les zones de fracturation et le Callovo-Oxfordien sur toute son épaisseur.

Tout en conservant le fonctionnement hydraulique du système, les galeries et ouvrages de liaison surface-fonds, les alvéoles MA-VL et les alvéoles HA et les forages font l'objet de simplifications géométriques. Leurs volumes sont conservés afin de respecter les concentrations, et chaque faisceau de galerie est regroupé en une macro-galerie selon le principe des sections hydrauliques équivalentes afin de respecter les vitesses d'écoulement de l'eau à travers les ouvrages de stockage. Il est en de même pour les zones endommagées du Callovo-Oxfordien autour des ouvrages.

4.2.2 Résultats

4.2.2.1 Intrusion dans le quartier MA-VL

Fonctionnement hydraulique

Le forage intrusif traverse tout le Callovo-Oxfordien. Les charges hydrauliques dans le forage au toit et au mur du Callovo-Oxfordien sont donc identiques à celles de l'Oxfordien et du Dogger. Elles génèrent un flux d'eau descendant dans le forage d'un peu moins de 1 m³ par an.

Le forage étant proche de l'équilibre hydraulique avec le Callovo-Oxfordien, il n'induit pas de flux hydrauliques significatifs à partir des ouvrages de stockage. Le débit drainé vers le Dogger est essentiellement fourni par les niveaux perméables de l'Oxfordien calcaire. Dans ces conditions, les performances hydrauliques des ouvrages de fermeture au sein du quartier MA-VL ont peu d'influence sur les débits molaires de radionucléides entrant dans le forage et *in fine* sur la dose à l'exutoire.

Débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien

Les débits molaires instantanés les plus forts sont obtenus pour les radionucléides caractérisés par une rétention faible ou nulle dans le Callovo-Oxfordien et le béton, par un inventaire initial significatif, et

par une période radioactive moyenne à longue. Il s'agit en particulier du carbone 14¹¹⁹ ($1,6 \cdot 10^{-1}$ moles par an), de l'iode 129 ($4,5 \cdot 10^{-2}$ moles par an) et du chlore 36 ($4,1 \cdot 10^{-2}$ moles par an). La date d'occurrence des débits maximum en sortie du forage au niveau du mur du Callovo-Oxfordien est la même pour tous les radionucléides, environ 100 ans après la date d'occurrence du forage.

Pour ce qui concerne l'iode 129, la fraction de l'inventaire MA-VL initial qui migre par le forage sur un million d'années est de l'ordre de 20 %. Elle représente environ 55 % de l'inventaire de l'alvéole MA-VL concerné¹²⁰. Pour le chlore 36, ces valeurs sont respectivement de l'ordre de 20 % et 45 %.

Les fractions des autres radionucléides sortant du forage sont inférieures à 10 % de l'inventaire total du quartier et représentent moins de 25 % de l'inventaire de l'alvéole MA-VL concerné. Cette atténuation est facilitée par :

- la décroissance radioactive des radionucléides mobiles et à vie moyenne tels que l'argent 108, le carbone 14 et le molybdène 93 ;
- la précipitation du sélénium 79 et du technétium 99 dans le Callovo-Oxfordien sain et endommagé autour des alvéoles MA-VL et du forage ;
- la sorption dans le béton et/ou dans le Callovo-Oxfordien sain et endommagé qui favorisent les échanges avec le Callovo-Oxfordien.

Ainsi les quantités de calcium 41, potassium 40, manganèse 53, fer 60, palladium 107, rubidium 87 et étain 126 sortant du forage en 1 million d'années représentent entre 1 à 5 % de l'inventaire initial de l'alvéole MA-VL concerné. Pour les autres radionucléides, et notamment les lanthanides et actinides, dont les rétentions sont plus élevées, les quantités sortant du forage en 1 million d'années sont inférieures à 1 % de l'inventaire initial de l'alvéole MA-VL concerné.

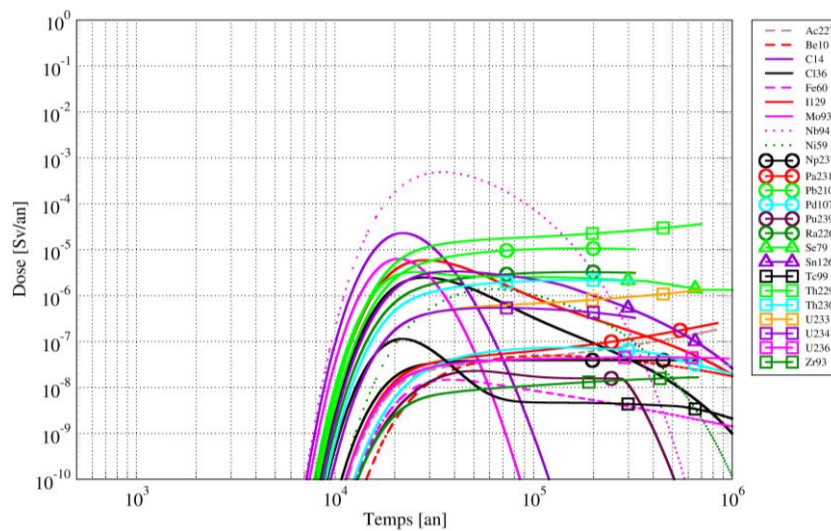
Doses à l'exutoire

Entre la sortie du forage et l'exutoire « Dogger » dans la zone de fracturation diffuse, la distance de migration dans les niveaux perméables du Dogger est d'environ 10 kilomètres. Pour une vitesse de pore d'environ 5 km pour 100 000 ans, la durée du transfert jusqu'à l'exutoire permet la décroissance de radionucléides de vie intermédiaire comme l'argent 108m et un transfert significatif vers le Callovo-Oxfordien, notamment pour les radionucléides sorbés dans le Callovo-Oxfordien.

La Figure 4.2-3 indique les doses à l'exutoire. Elle souligne la disparition de l'argent 108m et la forte atténuation du carbone 14. La plus forte dose, correspondant au niobium 94, est inférieure à 1 millisievert par an pour une date d'occurrence vers 35 000 ans.

¹¹⁹ Dans la présente évaluation, la totalité de l'inventaire en carbone 14 est supposé mobilisable.

¹²⁰ Pour rappel : une redistribution spécifique des familles est réalisée pour chaque radionucléide avec l'objectif d'obtenir la plus forte activité possible dans l'alvéole MA-VL n°5, dans le respect des règles de co-stockage physico-chimique et géométrique.



CG.IM.AEAP.15.0198.A

Figure 4.2-3 : SEA intrusion humaine - forage dans le quartier MA-VL - Doses à l'exutoire « Dogger » pour une biosphère tempérée

4.2.2.2 Intrusion dans le quartier HA

Fonctionnement hydraulique

Comme dans la situation d'intrusion dans le quartier MA-VL, le forage dans le quartier HA est proche de l'équilibre hydraulique avec le Callovo-Oxfordien. Dans ces conditions, le débit drainé par le forage, de l'ordre de 0,7 m³ par an, est essentiellement fourni par les horizons poreux perméables de l'Oxfordien calcaire.

Débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien

Des débits molaires instantanés maximaux de 4.10⁻⁵ moles par an et 3.10⁻⁵ moles par an sont atteints pour le chlore 36 et l'iode 129 respectivement, en raison de leur rétention nulle dans le Callovo-Oxfordien, d'un inventaire initial significatif et de leurs longues périodes radioactives. La quantité d'iode 129 sortant du forage en 1 million d'années équivaut à la « sollicitation » de l'ordre de 40 alvéoles HA, en considérant qu'environ 5 % de l'inventaire initial total entre dans la galerie d'accès sur cette période.

De même qu'en situation enveloppe du SEN, il est retenu une durée d'étanchéité conventionnelle du conteneur de stockage HA de 500 ans et un modèle d'altération du verre en vitesse initiale « V₀S » pour les colis de la famille concernée par le forage. En cohérence avec ces hypothèses, les historiques de débits molaires instantanés en sortie du forage au niveau du mur du Callovo-Oxfordien sont caractérisés pour l'iode 129 et le chlore 36, par une évolution croissance du débit molaire instantané à partir de 500 ans et jusqu'à atteindre un niveau maximum vers 15 000 ans. Ceci met en évidence un contrôle de l'effet du forage par le taux de relâchement du verre, le temps de transfert minimal des colis vers la galerie d'accès étant de l'ordre de 2 000 ans.

Pour tous les autres radionucléides traités, la sorption et/ou la faible solubilité sont suffisantes pour atténuer significativement les transferts vers le forage en favorisant un transfert par diffusion vers le Callovo-Oxfordien depuis les alvéoles HA.

Doses à l'exutoire

Compte tenu du temps de transfert dans le Dogger (cf. *supra*), les doses maximales obtenues à l'exutoire sont *in fine* de l'ordre de 0,0003 millisievert par an vers 600 000 ans pour le sélénium 79, de l'ordre de 0,0001 milli-Sievert par an vers 40 000 ans pour le chlore 36 et l'iode 129, et vers

25 000 ans pour le niobium 94. Les autres radionucléides génèrent des doses inférieures à 10^6 millisievert par an.

4.2.3 Enseignements

Compte tenu des caractéristiques hydrauliques du Callovo-Oxfordien, un forage traversant celui-ci et un alvéole MA-VL n'engendre pas de conséquences significatives sur le fonctionnement hydraulique du quartier MA-VL par rapport à celui du SEN. La prise en compte du temps de transfert dans le Dogger conduit à une forte atténuation des radionucléides à vie moyenne ce qui induit une dose résiduelle inférieure à 1 millisievert pour tous les radionucléides.

L'effet hydraulique du forage dans le quartier HA est également modéré. Les activités de l'iode 129 et du chlore 36 captées par le forage ne représentent qu'environ 0,2 % et 0,1 % de l'inventaire des quartiers HA1 et HA2. La limitation du relâchement par la matrice vitreuse combinée à l'atténuation de la migration des radionucléides le long de leur migration dans les alvéoles HA puis dans les galeries limite fortement l'activité atteignant le forage intrusif. La dose à l'exutoire est ainsi toujours inférieure à 0,001 millisievert par an.

4.3 Le scénario de prélèvement de carottes

4.3.1 Traitement du scénario

Horizon géologique cible - Objectifs et caractéristiques du forage

L'objectif scientifique de caractérisation du Callovo-Oxfordien est retenu comme motivation possible du prélèvement de carottes. En effet, dans le cas d'une « cible » plus profonde, et même en cas de perception d'anomalies ou en cas de blocage du train de tige au passage du stockage, la réalisation de carottes serait peu probable. Dans de telles circonstances, diverses manœuvres de déblocage et de changement d'outil seraient tentées pour passer l'obstacle. Enfin, à défaut de parvenir à traverser le stockage, le forage pourrait être cimenté sur quelques dizaines de mètres puis foré à nouveau avec déviation, voire déplacé en surface.

Le diamètre interne utile retenu pour le carottier est 100 mm¹²¹.

On notera que la tenue mécanique des carottes de déchets dépend de l'état de dégradation des colis de stockage traversés, à la date de l'intrusion. En cas de mauvaise tenue mécanique du déchet, une fraction seulement de la longueur carottée serait remontée sous forme de carotte. Les parties de colis friables et les déchets s'y trouvant passeraient dans le fluide de foration. Dans le cadre d'une approche majorante, il est considéré que la totalité du linéaire de déchets susceptibles de se trouver dans un colis de déchets sera remonté sous forme de carotte, dans la limite d'une longueur maximale fixée à 1 mètre en regard des pratiques usuelles¹²².

¹²¹ Ce diamètre correspond à l'enveloppe des diamètres utiles des outils de carottage usuels

¹²² Cette longueur est celle des contenants à carottes usuels.

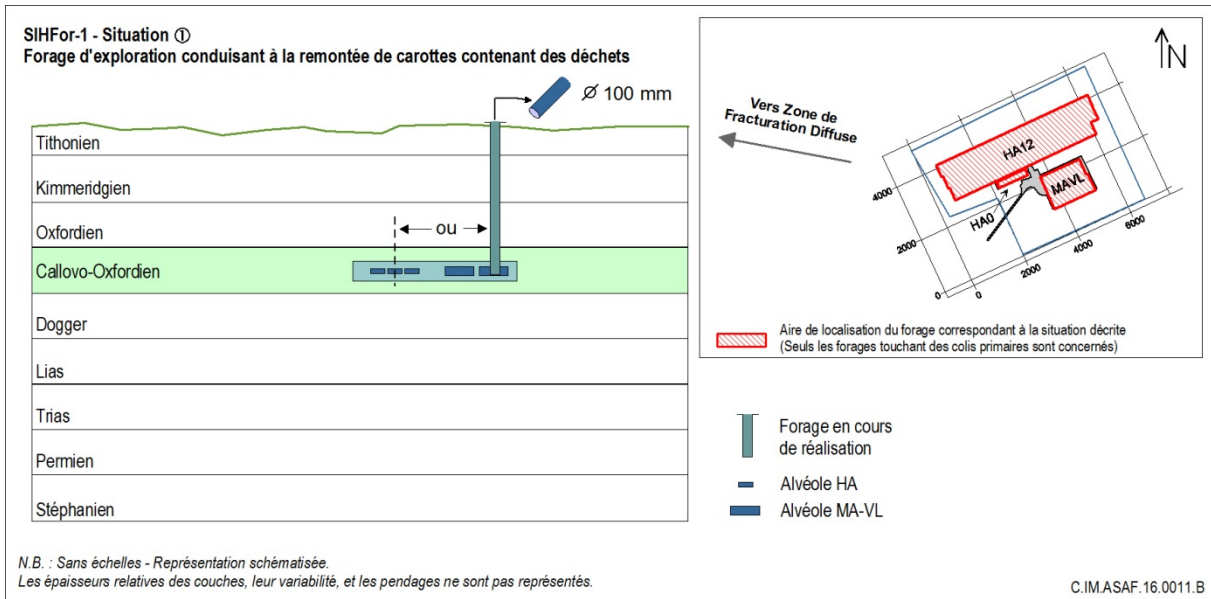


Figure 4.3-1 : Représentation schématique du scénario SIHFor-1 - « Forage d'exploration conduisant à la remontée de carottes contenant des déchets »

Manipulation des carottes

La longueur maximale usuelle d'un élément de carottier peut atteindre 9 m, plusieurs éléments pouvant être assemblés en série le cas échéant pour économiser du temps de manœuvre du train de tiges. A la remontée du carottier en surface, son contenu est transféré par le foreur dans des contenants dont la longueur usuelle est 1 m. Les éléments de carottes dépassant cette longueur sont fractionnés pour permettre leur rangement.

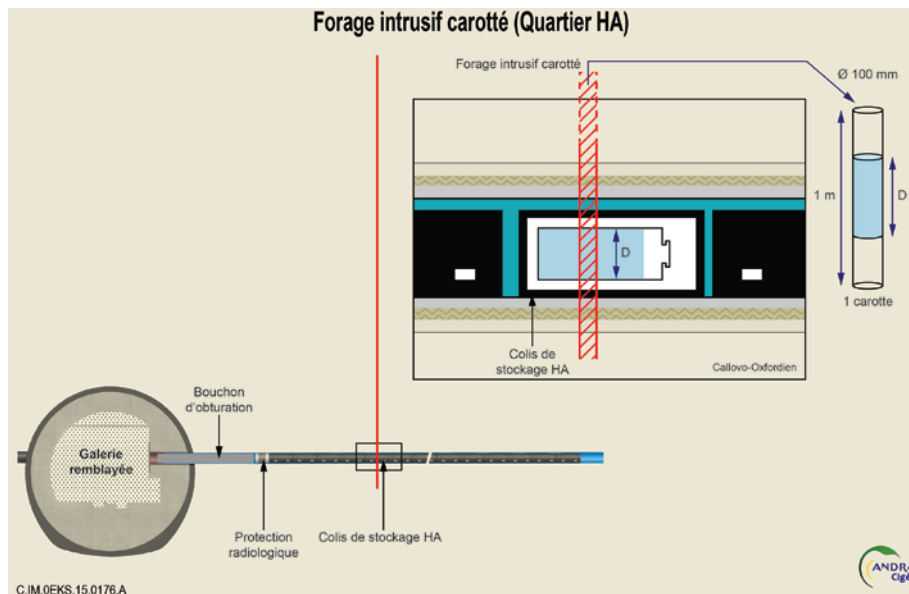


Figure 4.3-2 : Représentation schématique d'un carottage dans un quartier HA

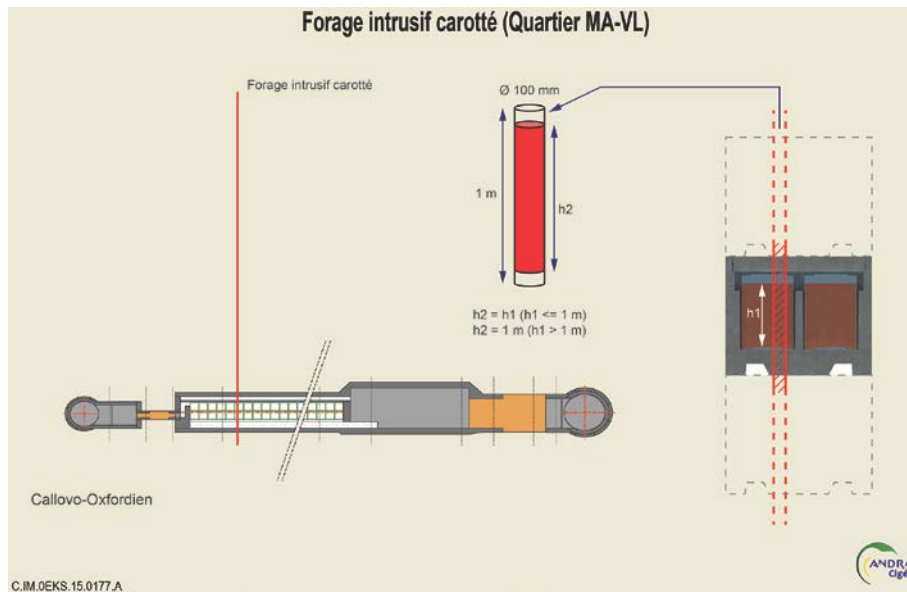


Figure 4.3-3 : Représentation schématique d'un carottage dans le quartier MA-VL

Les informations apportées par les carottes d'un premier forage sont présumées suffisantes pour que des dispositions de protection soient prises en cas de réalisations d'autres forages carottés lors d'une même campagne. Dans le cas d'une poursuite des investigations par carottage, le caractère « non intentionnel » de l'intrusion pourrait d'ailleurs être remis en cause.

Localisation du forage par rapport aux familles de colis

Le calcul de dose est réalisé pour chacune des 98 familles du PIGD. Il est cependant proposé de tenir compte du fait que certaines familles comptent très peu de colis et correspondent à une probabilité relative d'interception extrêmement faible¹²³.

Pour les familles de colis de déchets comportant moins de 10 colis, la probabilité relative d'interception par un forage réalisé au hasard à l'intérieur du périmètre des ouvrages « fond » est inférieure à $1/10^6$. Elles sont exclues des études d'évaluations d'impact du scénario.

Groupe de référence hypothétique concerné - Impact évalué

La durée d'exposition du foreur correspond à l'extraction des éléments de carottes du carottier, au fractionnement éventuel en morceaux inférieurs à 1 mètre de longueur et à la mise en place des carottes dans les contenants prévus. On peut estimer, en regard des pratiques usuelles, la durée de ces opérations entre 1 minute et 10 minutes environ par mètre de carotte en fonction des difficultés rencontrées (blocage de la carotte dans le carottier par exemple). Une durée d'exposition externe de 10 minutes est retenue pour la longueur de 1 mètre. Le calcul de l'impact considère une exposition de face à une distance de 40 cm par rapport au point le plus proche de la génératrice de la carotte cylindrique.

Un débit d'équivalent de dose est d'abord calculé en supposant une répartition homogène de l'activité du déchet extrait sur 1 mètre de carotte. Le calcul tient compte de l'atténuation liée à la densité de chaque déchet. Un facteur correctif est ensuite appliqué car le déchet peut être concentré sur une partie du linéaire de la carotte seulement. Pour chaque famille de colis, la dose équivalente totale est le cumul des contributions individuelles de chacun des 144 radionucléides présents dans le déchet sur la base des activités massiques de l'inventaire radiologique de référence de Cigéo.

¹²³ À titre indicatif, la probabilité d'interception pour un forage vertical réalisé au hasard à l'intérieur du périmètre des ouvrages « fond » (1100 ha environ) varie entre environ 1.10^6 pour les plus petites familles et $1/500$ environ pour les plus grandes familles compte tenu du positionnement prévisionnel des colis en stockage.

Date de l'intrusion et indicateurs

Les carottes sont supposées être prélevées 500 ans après la fermeture, dès la fin de la période conventionnelle de préservation de la mémoire. L'évolution de la dose est calculée depuis la fermeture jusqu'à 1 million d'années afin de vérifier que les doses à 500 ans sont toujours majorantes.

Il est également utilisé un indicateur combiné de « risque » en exposition externe pour hiérarchiser les familles de colis du PIGD, en tenant compte de leur taille. Cet indicateur est le produit de la dose par exposition externe à 500 ans pour une carotte par la « probabilité relative » qu'un forage réalisé au hasard à l'intérieur du périmètre des ouvrages « fond » affecte cette famille en particulier.

4.3.2 Résultats

Le Tableau 4.3-1 présente les 5 premières familles de colis de déchets HA puis les 5 premières familles de colis de déchets MA-VL au regard de la dose « foreur ». La première famille de colis HA et la première famille de colis MA-VL correspondent à une dose de l'ordre de 35 millisievert. Les deux colonnes de droite du tableau indiquent les deux radionucléides participant majoritairement à la dose.

Tableau 4.3-1 : *Évaluation de la dose reçue par un foreur pour une exposition externe à une carotte prélevée à 500 ans, pour les 5 premières familles HA et MA-VL.*

Famille du PIGD				Exposition externe à une carotte de 1 m (500 ans après fermeture)				Radionucléides contributeurs				
Nom	Quartier	Désignation abrégée	Nombre de colis primaires	Dose exposition externe [mSv] (1)	Rang "Dose exposition externe"	1 / probabilité relative de contact (2)	Rang probabilité relative	Rang "Risque, exposition externe" (3)	Premier contributeur et % de la dose totale	Deuxième contributeur et % de la dose totale		
COG-830	HA1 et 2	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres REP/RNR (SPX et PX)	1095	36	1	13600	21	3	Am241	87.2	Am243	11.4
COG-890	HA1 et 2	Colis de déchets vitrifiés issus du traitement des CU du CEA/DAM	80	36	2	185000	62	10	Am241	87.2	Am243	11.4
COG-880	HA1 et 2	Colis de déchets vitrifiés issus du traitement des CU du CEA/Civil	11	36	3	1350000	90	25	Am241	87.2	Am243	11.4
COG-900	HA1 et 2	Colis de déchets vitrifiés issus du traitement des CU EL4	30	23	5	495000	78	19	Am241	86.0	Am243	12.5
COG-850	HA1 et 2	Déchets technologiques issus des ateliers de vitrification conditionnés en Conteneurs Standards	200	14	10	52300	45	9	Nb94	100.0	Am241	0.0
EDF-120	MAVL	Déchets AMI Chinon	100	32	4	122000	57	8	Ag108m	90.0	Ni59	8.8
COG-450	MAVL	Conteneurs CSD-C de déchets de structure d'assemblages REP et RNR	1514	23	6	67700	51	5	Nb94	100.0	Am241	0.0
COG-540	MAVL	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU du CEA/DAM	400	23	7	256000	70	12	Nb94	100.0	Am241	0.0
COG-550	MAVL	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU EL4	200	23	8	513000	80	21	Nb94	100.0	Am241	0.0
COG-530	MAVL	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU du CEA/Civil	24	23	9	4270000	100	32	Nb94	100.0	Am241	0.0

(1) Exposition 10 minutes. Prise en compte d'un facteur de correction pour les carottes avec linéaire de déchet inférieur à 1 m.

(2) "Surface à l'intérieur du périmètre des ouvrages fond de Cigéo" / "Surface des colis primaires en projection verticale"

(3) Rang du produit "Dose exposition externe" x "Probabilité relative de contact"

Les dix premières familles comportent entre une dizaine et environ 1500 colis primaires; la probabilité qu'un forage les intercepte est donc plus réduite que pour les familles à fortes populations de colis.

Le Tableau 4.3-2 propose une autre hiérarchisation des familles de colis de déchets basée sur l'indicateur combiné « risque » qui intègre la dose par carotte et la surface horizontale globale des familles de colis de déchets en configuration de stockage. Il donne une meilleure visibilité des familles comportant un grand nombre de colis.

Tableau 4.3-2 : Évaluation de la dose foreur pour une exposition externe à une carotte à 500 ans pour les 5 premières familles HA et MA-VL au regard de l'indicateur combiné « risque exposition externe ».

Famille du PIGD				Exposition externe à une carotte de 1 m (500 ans après fermeture)					Radionucléides contributeurs			
Nom	Quartier	Désignation abrégée	Nombre de colis primaires	Dose exposition externe [mSv] (1)	Rang "Dose exposition externe"	1 / probabilité relative de contact (2)	Rang probabilité relative	Rang "Risque, exposition externe" (3)	Premier contributeur et % de la dose totale		Deuxième contributeur et % de la dose totale	
COG-200	HA1 et 2	Conteneurs Standard de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres UOX/URE/MOX	24060	7.2	12	617	1	1	Am241	87.2	Am243	11.4
COG-800	HA1 et 2	Conteneurs Standard de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres UOX (spécification 300 AQ 060)	19010	4.6	14	781	2	2	Am241	86.0	Am243	12.5
COG-830	HA1 et 2	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres REP/RNR (SPX et PX)	1095	36	1	13600	21	3	Am241	87.2	Am243	11.4
COG-140	HA1 et 2	Conteneurs Standard de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres UOX (spécification 300 AQ 016)	6900	1.9	19	2150	7	4	Am241	85.5	Am243	13.3
COG-850	HA1 et 2	Déchets technologiques issus des ateliers de vitrification conditionnés en Conteneurs Standards	200	14	10	52300	45	9	Nb94	100.0	Am241	0.0
COG-450	MAVL	Conteneurs CSD-C de déchets de structure d'assemblages REP et RNR	1514	23	6	67700	51	5	Nb94	100.0	Am241	0.0
COG-120	MAVL	Conteneurs CSD-C de coques et embouts issus d'assemblages UOX/URE/MOX	22720	1.4	21	4510	11	6	Nb94	99.9	Am241	0.1
COG-110	MAVL	Conteneurs Standards CSD-C de coques et embouts d'assemblages combustibles UOX	17850	1.8	20	5740	13	7	Nb94	99.9	Am241	0.1
EDF-120	MAVL	Déchets AMI Chinon	100	32	4	122000	57	8	Ag108m	90.0	Ni59	8.8
EDF-100	MAVL	DAD des REP du parc actuel (dont BCOT)	6360	0.24	32	1280	3	11	Ni59	96.7	Nb94	3.1

(1) Exposition 10 minutes. Prise en compte d'un facteur de correction pour les carottes avec linéaire de déchet inférieur à 1 m.

(2) "Surface à l'intérieur du périmètre des ouvrages fond de Cigéo" / "Surface des colis primaires en projection verticale"

(3) Rang du produit "Dose exposition externe" x "Probabilité relative de contact"

Evolution de l'impact dans le temps.

Le calcul de la dose à 500 ans après fermeture permet d'obtenir une évaluation majorante sur un million d'années pour la plupart des familles. Les quelques familles pour lesquels l'activité de certains radionucléides peut significativement croître après 500 ans correspondent toutes à des doses maximales inférieures à 0,005 milli-Sievert.

La Figure 4.3-4 donne à titre illustratif l'évolution de la dose pour les cinq premières familles de colis de déchets HA ainsi que pour les cinq premières familles de colis MA-VL classées au regard de l'indicateur combiné « risque en exposition externe ».

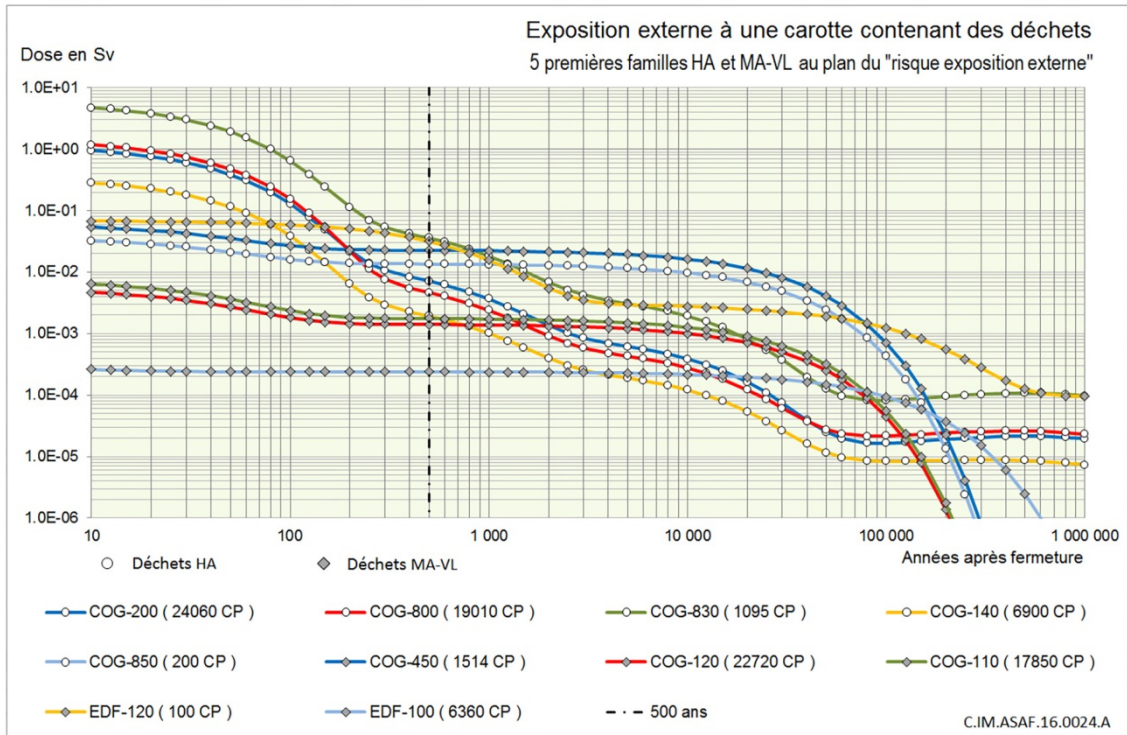


Figure 4.3-4 : Evolution sur 1 million d'années de la dose reçue par un foreur exposition externe à une carotte prélevée à 500 ans pour les 5 premières familles HA et MA-VL classées selon le « risque exposition externe ».

4.3.3 Enseignements

Ce scénario à caractère conventionnel postule la réalisation de carottes dans les colis de déchets.

Les impacts radiologiques enveloppes à 500 ans sur un foreur sont du même ordre de grandeur pour les quartiers HA1/HA2 et MA-VL (de l'ordre de quarante millisievert). Les radionucléides les plus contributeurs à l'impact sont respectivement, pour les colis de déchets HA (HA1/HA2), l'américium 241 et l'américium 243, et pour les colis de déchets MA-VL, l'argent 108m et le nickel 59.

On notera que si l'on considère uniquement les familles de chaque quartier HA et MA-VL comportant le plus grand nombre de colis (5000 à 25 000 colis par famille), les impacts les plus élevés à 500 ans seraient respectivement de l'ordre de 7 millisievert pour les quartiers HA et de l'ordre de 2 millisievert pour le quartier MA-VL.

4.4 Le scénario « What-if » d'intrusion humaine

4.4.1 Traitement du scénario

Horizon géologique cible - Objectifs et caractéristiques du forage

Le scénario SIHFor-3 (situation[©]) est la situation « enveloppe » retenue au titre des impacts possibles vers l'exutoire SEN du Barrois en lien avec un forage abandonné à la cote du stockage (Cf. Figure 4.4-1).

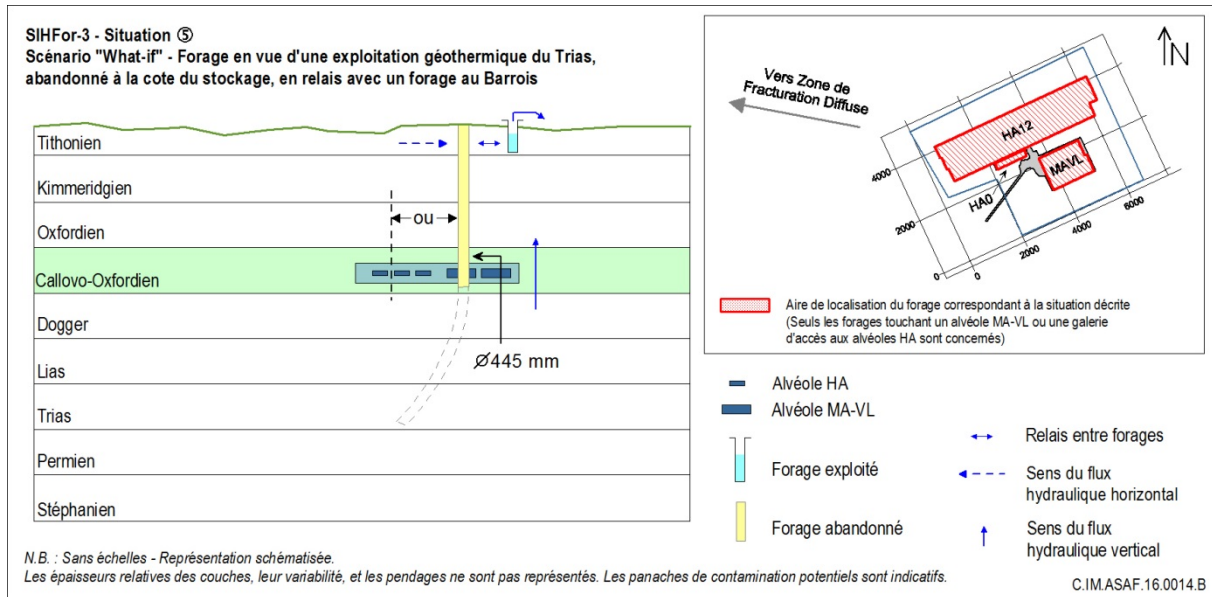


Figure 4.4-1 : Représentation schématique du scénario 'What-if' SIHFor-3 - « Forage en vue d'une exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage, en relais avec un forage d'exploitation du Barrois (Tithonien) ».

Ce scénario considère que :

- le forage est abandonné au niveau du stockage ;
- le diamètre de foration à la profondeur du stockage est de 445 mm ;
- le forage abandonné est supposé conserver sa géométrie de manière pérenne ;
- dans une logique de la recherche de valeurs conservatrices en situation enveloppe, le forage est représenté par un milieu poreux de perméabilité de 10-5 m/s ;
- le forage abandonné se trouve dans une disposition géométrique qui permet un relais hydraulique vers un ouvrage d'exploitation des niveaux aquifères du Barrois (Tithonien) ;
- des flux de radionucléides sortant du Callovo-Oxfordien par le forage abandonné sont intégralement et immédiatement transférés vers le forage en exploitation dans le Barrois.

Du fait de la faible vraisemblance du cumul de certaines de ces hypothèses, ce scénario est classé dans la catégorie « *What-if* ».

Types d'impacts et groupes de référence hypothétiques

L'exutoire susceptible d'être influencé dans cette situation est un forage d'exploitation d'eau dans le Barrois (Tithonien) supposé en configuration de relai hydraulique. Ce type d'exutoire est déjà considéré en SEN ; le groupe de référence hypothétique et les modes d'atteinte sont donc identiques à ceux du SEN.

Localisation du forage par rapport aux ouvrages de stockage

La localisation supposée de l'intrusion par rapport aux ouvrages de stockage suit les mêmes règles que pour le scénario précédent (Cf. § 4.4.1) : intrusion au droit d'une galerie d'accès du quartier HA1 qui contient les plus fortes densités surfaciques d'activité ou au droit de l'alvéole MA-VL n°5.

Nombre de forages considérés

Le scénario considère un seul forage intrusif¹²⁴.

Date de l'intrusion et prise en compte des radionucléides

La date de 500 ans après fermeture est retenue comme date d'abandon du forage intrusif qui fonctionne dès lors de manière permanente comme un drain dont le moteur est la différence de charge hydraulique entre le Dogger et l'Oxfordien.

La liste des radionucléides retenus pour l'évaluation d'impact au regard de leur mobilité est présentée en annexe 2. Les modèles de relâchement des colis de déchets sont identiques à ceux de la situation enveloppe du SEN.

Paramètres – Indicateurs

Les hypothèses et les données de base retenues (hors celles liées à l'intrusion) sont identiques à celles de la situation enveloppe du SEN correspondant à un positionnement du stockage dans le Callovo-Oxfordien avec une garde supérieure (de Callovo-Oxfordien) de 50 mètres.

Le plus fort gradient de charge vertical ascendant dans la ZIRA sur le million d'années, soit 0,1 m/m, est considéré de manière uniforme et pérenne sur le million d'années. De manière conservative, le forage intrusif est supposé relié au forage d'exploitation des niveaux aquifères du Barrois. Le calcul des concentrations prend en compte une dilution correspondant à un débit d'exploitation de 150 L par minute.

L'indicateur final est l'évolution de la dose à l'exutoire « forage du Barrois ; des indicateurs intermédiaires comme le débit hydraulique du forage intrusif et les débits molaires des radionucléides en sortie du forage intrusif sont aussi évalués.

Conceptualisation numérique

La conceptualisation numérique suit les principes décrits au §4.2.1.

4.4.2 Résultats

4.4.2.1 Intrusion concernant le quartier MA-VL

Fonctionnement hydraulique

La présence du forage abandonné à la cote du stockage conduit à un champ de charge hydraulique qui génère une circulation d'eau vers l'encaissant supérieur. Le flux hydraulique drainé par le forage est limité par la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien.

Plusieurs éléments contribuent à une perturbation hydraulique dans le stockage plus importante que pour le scénario SEA de forage au Dogger :

- le fait que le court-circuit ne concerne que la garde supérieure ce qui ne permet pas une alimentation hydraulique privilégiée par l'encaissant inférieur ;
- un diamètre de forage doublé en comparaison d'un forage de reconnaissance ;
- un gradient hydraulique vertical plus élevé.

La Figure 4.4-2 présente les comportements hydrauliques du quartier MA-VL. Dans la configuration « sans scellement » à l'intérieur du quartier MA-VL, le rayon d'influence hydraulique du forage s'étend sur l'intégralité du quartier et le débit drainé est de l'ordre de 2,1 m³ par an. Les pertes de charge dans l'ensemble du quartier, de l'ordre de 3 mètres, sont de 4 mètres au maximum dans l'alvéole MA-VL concerné.

¹²⁴ La probabilité que deux forages, et a fortiori trois forages successifs, réalisés de manière aléatoire sur l'empreinte du stockage, touchent des ouvrages du stockage est faible. En tout état de cause, des calculs exploratoires ont montré que dans le cas hypothétique de deux forages intrusifs simultanés il ne se produisait pas d'effets synergiques.

Dans une configuration considérant la fermeture des alvéoles MA-VL par des scellements, les pertes de charge, inférieures à 1,5 m dans l'ensemble du quartier MA-VL, dépassent 5 m dans l'alvéole MA-VL concerné. Le débit drainé est néanmoins limité, environ 0,8 m³ par an. Cette valeur de flux inférieure d'un facteur 3 environ à celui obtenu avec des scellements d'alvéoles MA-VL correspond à une réduction équivalente des vitesses convectives vers le forage.

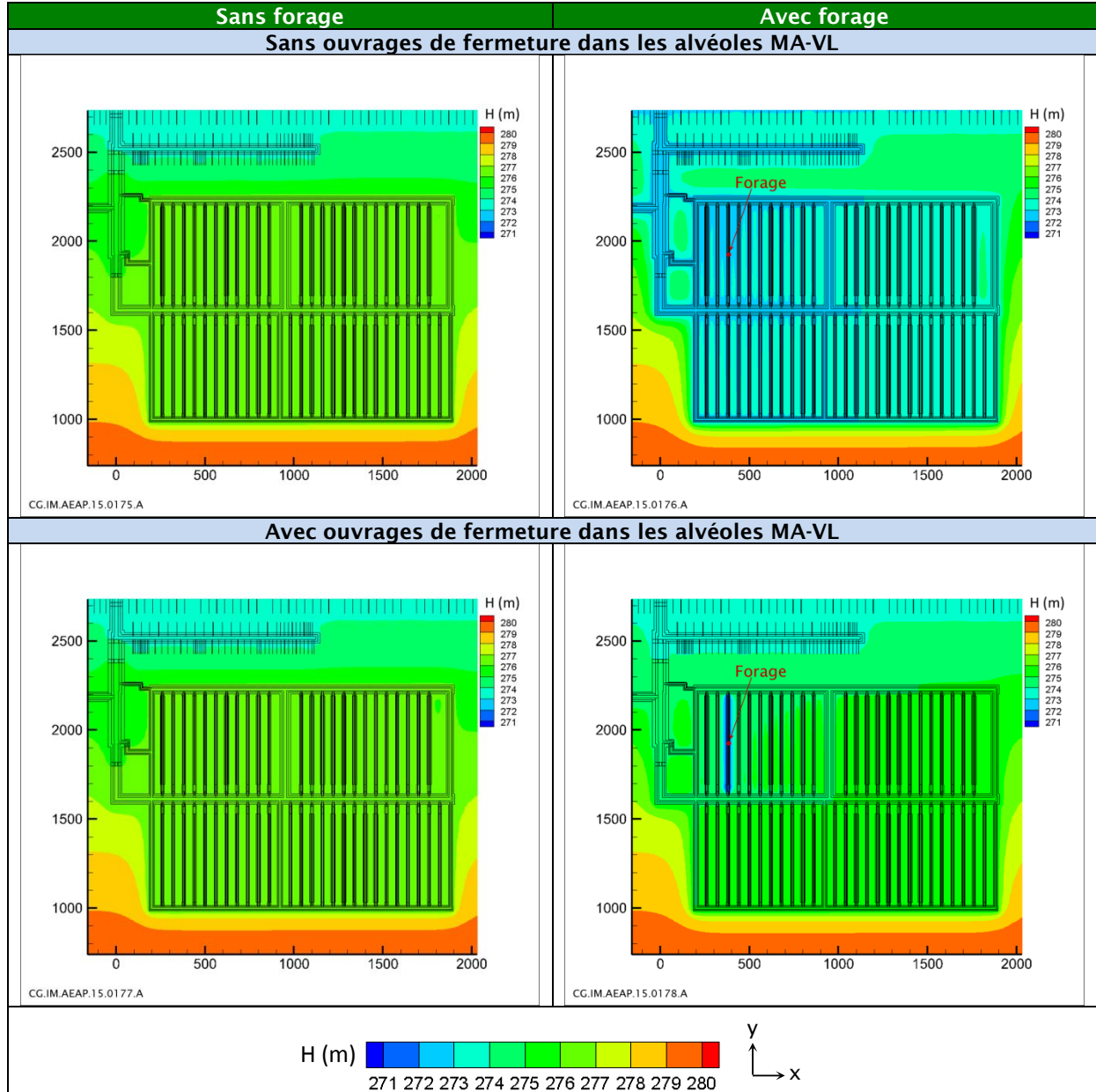


Figure 4.4-2 : Cartographie des charges hydrauliques dans le quartier MA-VL (plan horizontal traversant les ouvrages de stockage) - Avec et sans ouvrages de fermeture des alvéoles MA-VL - Avec et sans forage intrusif.

Débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien

Le drainage du forage induit des débits molaires sortant du Callovo-Oxfordien supérieurs d'un facteur 4 environ à ceux aux sorties vers le Dogger du SEA d'intrusion humaine de la situation 3. Les radionucléides concernés sont le carbone 14¹²⁵, l'iode 129 et le chlore 36, avec pour des débits

¹²⁵ L'inventaire en carbone 14 est supposé entièrement mobilisable pour cette évaluation.

molaires compris entre 0,1 et 1 mole par an. Dans cette situation, les sorties cumulées du forage sur le million d'années dépassent l'activité initiale du seul alvéole MA-VL atteint par le forage. Pour l'aluminium 26, l'iode 129 et le chlore 36, les sorties cumulées représentent respectivement 30 %, 46 % et 44 % de leurs inventaires MA-VL initiaux soit 192 %, 133 % et 109 % de l'inventaire de l'alvéole MA-VL atteint par le forage.

Les sorties cumulées sur le million d'années représentent environ 30 % de l'inventaire initial total du quartier MA-VL pour le molybdène 93, 12 % pour le carbone 14 et 4 % pour l'argent 108.

Pour les autres radionucléides, les sorties cumulées représentent :

- 20 % de l'inventaire initial total du quartier MA-VL pour le palladium 107, caractérisé par une rétention moyenne, et pour le sélénium 79 du fait d'une rétention faible dans le Callovo-Oxfordien et le béton des alvéoles MA-VL ;
- 1 à 5 % de l'inventaire initial total du quartier pour les radionucléides caractérisés par (i) une rétention moyenne comme le calcium 41, le potassium 40, le rubidium 87 et l'étain 106, et (ii) une rétention forte associée à un inventaire de l'alvéole MA-VL impacté représentant plus de 65 % de l'inventaire total MA-VL tels que le niobium 92 et le béryllium 10 ;
- moins de 1 % pour les radionucléides présentant une rétention forte à très forte (dans les composants cimentaires et le Callovo-Oxfordien) tels que les actinides et lanthanides notamment.

Doses à l'exutoire

La Figure 4.4-3 montre les historiques des doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois ». Les doses maximales restent très inférieures aux effets déterministes. Les temps d'occurrence de ces doses maximales à l'exutoire sont de quelques dizaines d'années après l'occurrence du forage pour les radionucléides mobiles ou présentant une faible rétention dans le Callovo-Oxfordien et les composants cimentaires, et de quelques dizaines de milliers d'années pour les éléments sorbés (actinides, lanthanides).

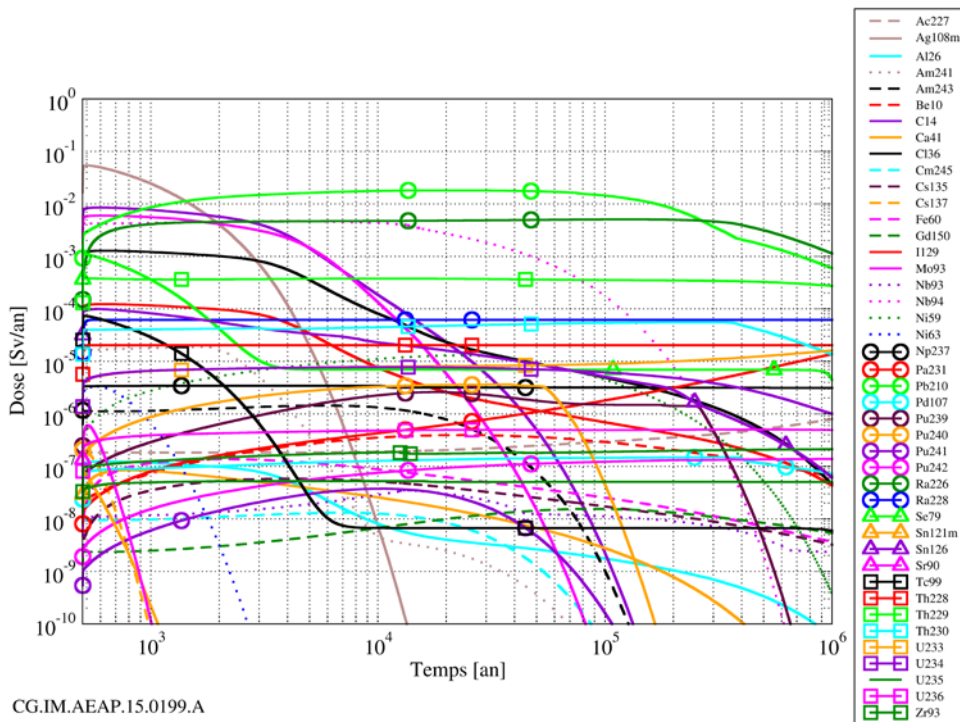


Figure 4.4-3 : *What-if d'intrusion humaine - forage dans le quartier MA-VL (sans ouvrages de fermeture de d'alvéoles MA-VL) : historiques de doses à l'exutoire « Barrois » pour une biosphère tempérée pour les 43 radionucléides dont la dose maximale excède 10^{-10} Sv/an.*

4.4.2.2 Intrusion dans le quartier HA

Fonctionnement hydraulique

Sous l'effet du gradient hydraulique vertical dans le Callovo-Oxfordien, le forage intrusif abandonné transmet une dépression hydraulique aux ouvrages de stockage et génère un flux sortant vers l'Oxfordien calcaire. Le forage draine un débit d'eau de l'ordre de 1,8 mètres cube par an.

Le rayon d'influence hydraulique du forage à l'équilibre s'étend sur l'intégralité de la division dans laquelle est situé l'alvéole atteint par le forage (1/6^{ème} de la zone HA) (Cf. Figure 4.4-4). Au sein des ouvrages de stockage, la répartition de la perte de charge est dissymétrique de chaque côté du forage du fait d'une alimentation en eau plus élevée par le faisceau de galeries de liaison par rapport au fond du quartier HA.

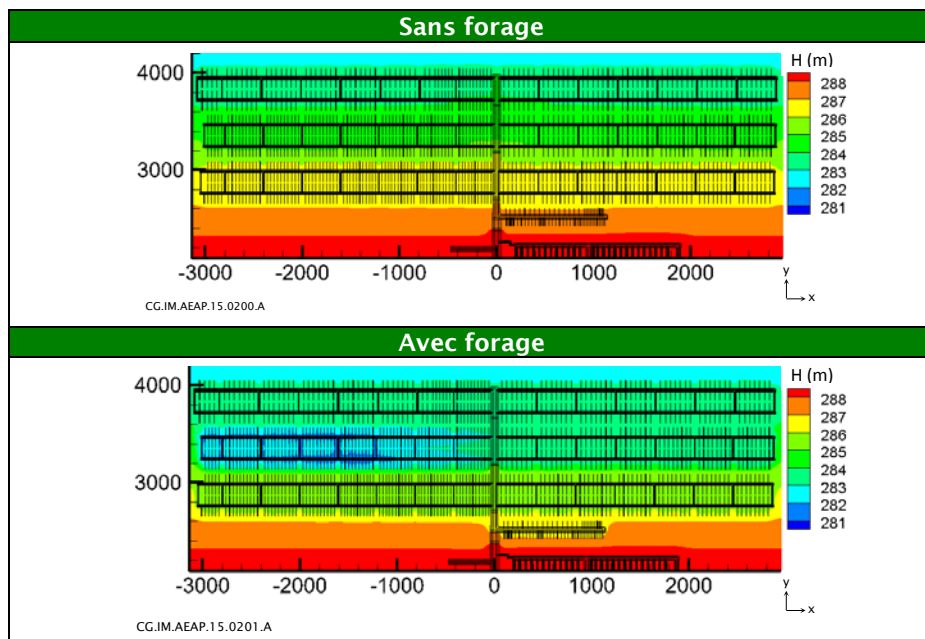


Figure 4.4-4 : Cartographie des charges hydrauliques des quartiers HA1 et HA2 dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage avec et sans forage intrusif.

Débit molaire en sortie du Callovo-Oxfordien

Comme dans le cas du scénario d'intrusion au Dogger, les débits molaires instantanés les plus élevés sont obtenus pour le chlore 36 et l'iode 129 qui sont caractérisés par une rétention nulle dans le Callovo-Oxfordien, un inventaire initial significatif et une période radioactive longue. Du fait d'une perturbation hydraulique induite importante, les niveaux de leurs maxima de débit molaire sont supérieurs d'un facteur 10 environ à ceux obtenus pour le SEA de la situation 3, soit respectivement environ $3,4 \cdot 10^{-4}$ moles par an et $2,3 \cdot 10^{-4}$ moles par an.

Ceci met en évidence une augmentation du « rayon d'influence radiologique », consécutive à celle du rayon d'influence hydraulique ; il en résulte une augmentation du transfert par convection en direction du forage et une réduction des échanges par diffusion avec le Callovo-Oxfordien.

Dose à l'exutoire

Les doses maximales obtenues au droit du forage au Barrois en relais du forage abandonné sont de l'ordre de 3 milli-sievert par an pour le sélénium 79 et pour le chlore 36, de l'ordre de 0,001 milli-Sievert par an pour le niobium 94 et de l'ordre de 0,0002 milli-sievert pour le molybdène 93 et l'iode 129. Elles sont inférieures à $5 \cdot 10^{-5}$ milli-sievert par an pour les autres radionucléides.

Les dates d'occurrence de ces maxima de dose à l'exutoire « pompage dans le Barrois » sont de quelques milliers d'années pour les radionucléides à vie moyenne tels que niobium 94, molybdène 93

et carbone 14 organique, d'environ 15 000 ans (fin du terme source) pour les radionucléides mobiles, solubles à vie longue (iode 129, chlore 36), et quelque centaines de milliers d'années pour le sélénium 79, contrôlé par sa solubilité.

4.4.3 Enseignements

Le scénario « What-if » d'intrusion humaine involontaire combine un ensemble d'hypothèses peu vraisemblables ainsi que des paramètres tendant à majorer les impacts :

- caractéristiques pénalisantes pour le forage intrusif (date d'occurrence, perte d'étanchéité immédiate des tubages éventuels, perméabilité résiduelle d'un sable après abandon, grand diamètre, connexion hydraulique directe avec un forage exploité) ;
- positionnement du forage dans les zones de plus forte activité des zones MA-VL ou HA ;
- hypothèses de localisation de l'inventaire radiologique dans le quartier MA-VL.

La réalisation de ce type de forage étant jugée plus improbable que celle d'un forage de reconnaissance, ce scénario est classé dans la catégorie « What-if » ; il est destiné à évaluer la robustesse du système de stockage.

Quartier MA-VL

- Quartier MA-VL avec fermetures des alvéoles MA-VL par un matériau de performances équivalentes à celles d'un remblai

Dans cette configuration le rayon d'influence hydraulique du forage concerne jusqu'à 10 alvéoles MA-VL pour les radionucléides les plus mobiles. La dose instantanée la plus élevée, de l'ordre de 55 millisievert par an, est liée à l'argent 108 m. La dose due au plomb 210 atteint un maximum inférieur à 20 millisievert vers 20 000 ans. Jusqu'à 10 000 ans environ les flux molaires et les dates d'occurrence ne dépendent que du contenu de l'alvéole MA-VL impacté ; à plus long terme, jusqu'à 10 alvéoles MA-VL adjacents sont potentiellement mobilisés pour ce qui concerne les radionucléides les plus mobiles.

- Quartier MA-VL avec fermeture des alvéoles par des scellements

La présence des scellements limite le débit d'eau sortant à environ 0,8 mètres cubes par an. Sur la base d'évaluations préparatoires concernant l'iode 129, il apparaît que cette limitation conduit à un flux molaire maximum réduit d'un facteur 5 environ et à un retard de quelque milliers d'années par rapport au cas avec fermeture par du remblai. Comme dans la situation précédente, les flux molaires et les dates d'occurrence dépendent uniquement du contenu de l'alvéole atteinte par le forage jusqu'à 10 000 ans environ. Au-delà, la présence des scellements limite le « rayon radiologique » maximal du forage à 5 alvéoles environ.

Quartier HA

Sur un million d'années, l'activité drainée par le forage représente environ 3 % de l'iode 129 et 2 % du chlore 36 des inventaires totaux des quartiers HA1 et HA2. Les doses maximales sont de l'ordre de 0,003 milli-sievert par an pour le sélénium 79 et le chlore 36. Pour tous les autres radionucléides les doses maximales sont inférieures à 0,001 milli-sievert par an.

5

Les scénarios What-if

<i>5.1</i>	<i>Les scénarios dysfonctionnement fermeture</i>	<i>« What-if » des ouvrages</i>	<i>de de</i>	<i>360</i>
<i>5.2</i>	<i>Les scénarios dysfonctionnement stockage</i>	<i>« What-if » des conteneurs</i>	<i>de de</i>	<i>378</i>

5.1 Les scénarios « *What-if* » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture

5.1.1 Rappel des scénarios retenus

Les scénarios « *What-if* » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture correspondent à la défaillance d'un ou de plusieurs type(s) des scellements devant concourir à augmenter la résistance hydraulique des galeries et des liaisons surface-fond (LSF). Ils ont été identifiés sur la base d'une analyse des risques et incertitudes relatifs aux causes potentielles de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture, en particulier des scellements mis en place dans les galeries et dans les LSF (cf. section 1.3.1 du présent volume).

Cette analyse a conduit à définir trois scénarios « *What-if* » (cf. Tableau 1.7-3) :

- un scénario *What-if* de « Dysfonctionnement des scellements des LSF par cumul d'une défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien » (non déposé du revêtement) ;
- un scénario *What-if* de « Dysfonctionnement des scellements de galeries par cumul d'une défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien » ;
- un scénario *What-if* de « Dysfonctionnement de tous les scellements par cumul d'une défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ».

Le Tableau 5.1-1 ci-dessous synthétise la liste des scénarios « *What-if* » et des composants concernés.

Tableau 5.1-1 : Scénarios « *What-if* » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture

What-if de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture	Type d'ouvrages de fermeture			
	Scellements de puits	Scellements de descenderie	Scellements de galerie	Scellements d'alvéole MA-VL (le cas échéant)
What-if « Dysfonctionnement des scellements de LSF »	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante (revêtement non déposé)	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante (revêtement non déposé)	- Noyau efficace - Interface noyau/argilites efficace	- Noyau efficace - Interface noyau/argilites efficace
What-if « Dysfonctionnement des scellements de galeries »	- Noyau efficace - Interface noyau/argilites efficace	- Noyau efficace - Interface noyau/argilites efficace	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante
What-if « Dysfonctionnement de tous les scellements »	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante (revêtement non déposé)	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante (revêtement non déposé)	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante	- Noyau défaillant - Interface noyau/argilites défaillante

5.1.2 Description et conceptualisation des scénarios What-if de « Dysfonctionnement des ouvrages de fermeture »

5.1.2.1 Description du scénario « What-if » de Dysfonctionnement des scellements des LSF

Ce scénario « What-if » considère que :

- tous les scellements des LSF dysfonctionnent. La défaillance est représentée par un défaut du noyau argileux et par une interface imparfaite ;
- les scellements de galerie sont efficaces.

Représentation des scellements des LSF défaillants

Le noyau argileux des scellements des LSF est représenté avec des caractéristiques hydrauliques équivalentes à celle d'un remblai, telles que définies dans le SEN.

Le revêtement laissé en place est représenté de la même manière que les portions de revêtement au droit des scellements de galerie dans le SEN, avec une perméabilité équivalente à celle d'un sable. Il n'est pas considéré de ZFC au droit du noyau argileux, toutefois la ZFD est représentée en référence et en enveloppe.

La Figure 5.1-1 ci-dessous est une représentation schématique du dysfonctionnement en What-if des scellements de puits. Les scellements de descenderie défaillants sont représentés de la même manière, excepté les aspects géométriques.

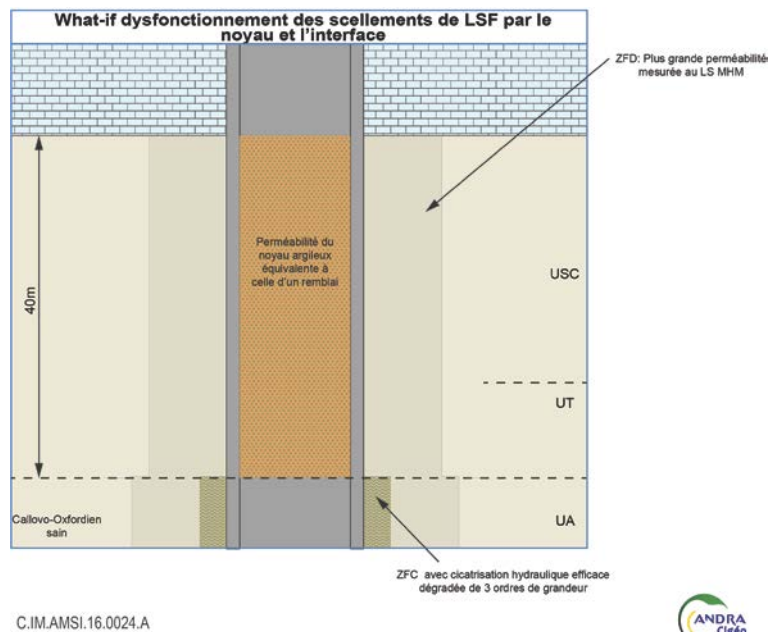


Figure 5.1-1 : Représentation schématique des scellements de puits dans le What-if « Dysfonctionnement des scellements des LSF » (en situation enveloppe)

De la même manière que pour le scénario d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements de LSF, la date d'occurrence de la défaillance est prise égale au début de la phase après fermeture¹²⁶.

Représentation des ouvrages dans l'USC/UT (au droit des sections courantes des descenderies, hors scellements)

Les argilites au droit des sections courantes des descenderies dans l'USC et l'UT sont représentées de la même manière qu'au droit des noyaux argileux, c'est-à-dire avec une ZFD telle que représentée dans la Figure 5.1-1.

¹²⁶ A la date de fermeture, les scellements et le stockage sont représentés initialement saturés comme pour le SEN.

Représentation des scellements de galerie

Dans ce scénario, les scellements de galerie sont considérés performants. Ils sont représentés de la même manière que dans le SEN.

Représentation des ouvrages dans l'UA (hors scellements)

Les alvéoles de stockage ainsi que les sections courantes de galerie et de LSF dans l'UA sont représentés de la même manière que dans le SEN.

5.1.2.2 Description du « *What-if* » Dysfonctionnement des scellements des galeries

Ce scénario considère que :

- l'ensemble des scellements de galerie dysfonctionne. Ce dysfonctionnement est représenté par un cumul de défaillances du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ;
- les scellements des liaisons surface-fond sont considérés efficaces.

Représentation du dysfonctionnement des scellements de galerie

De la même manière que précédemment, la date d'occurrence de la défaillance des scellements de galerie est prise égale au début de la phase après fermeture.

Le noyau argileux des scellements de galerie, considéré défaillant, est représenté avec des caractéristiques hydrauliques équivalentes à celle d'un remblai (cf. Tableau 5.1-2).

Une ZFC continue est considérée au droit du noyau argileux. Sa perméabilité est représentative d'une cicatrisation hydraulique « efficace » dégradée de quatre ordres de grandeur.

La ZFD n'est pas cicatrisée. Elle est représentée avec une perméabilité conservatrice en référence et en situation enveloppe (cf. Tableau 5.1-2).

La Figure 5.1-2 ci-dessous est une représentation schématique des scellements de galerie en scénario « *What-if* ».

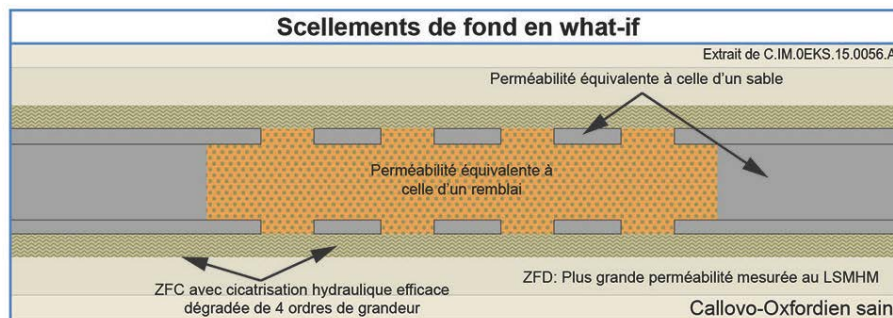


Figure 5.1-2 : Représentation schématique des scellements de galerie dans le « *What-if* » « Dysfonctionnement des scellements de galerie »

Représentation des ouvrages dans l'UA (hors scellements)

Il est fait l'hypothèse que la ZFD et la ZFC présentent les mêmes caractéristiques au droit des autres ouvrages dans l'UA (sections courantes de galerie, LSF, alvéoles de stockage) que celles au droit des scellements, à savoir (cf. Tableau 5.1-2) :

- la ZFC au droit de ces zones présente une perméabilité à l'eau représentative d'une cicatrisation hydraulique « efficace » dégradée de quatre ordres de grandeur ;
- la ZFD est représentée avec une perméabilité conservatrice.

Représentation des ouvrages dans l'USC/UT

Dans ce scénario, les scellements des LSF sont représentés de la même manière que dans le SEN, mais avec la présence d'une ZFD.

Les argilites au droit des sections courantes des descenderies dans l'USC et l'UT sont représentées avec une ZFD en situation de référence et en situation enveloppe.

5.1.2.3 Description du « *What-if* » de Dysfonctionnement de tous les scellements

Ce scénario considère le dysfonctionnement (« *What-if* ») de tous les scellements (scellements de LSF et scellements de galeries) par un cumul de défaillances :

- du noyau argileux ;
- de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien :
 - ✓ pour les scellements des liaisons surface-fond, par le maintien du revêtement au droit du noyau argileux, constituant ainsi un défaut d'interface entre noyau argileux et argilites ;
 - ✓ pour les scellements de galerie, par une ZFC de perméabilité élevée (cicatrisation hydraulique dégradée).

Représentation du dysfonctionnement des scellements de liaisons surface-fond

Le dysfonctionnement des scellements de liaisons surface-fond est représenté de la même manière que dans le « *What-if* » de Dysfonctionnement des scellements de liaisons surface-fond (cf. section 0).

Représentation des scellements de galerie

Le dysfonctionnement des scellements de galerie est représenté de la même manière que dans le « *What-if* » de Dysfonctionnement des scellements de galerie (cf. section 5.1.2.2).

Représentation des ouvrages dans l'USC/UT (au droit des sections courantes des descenderies, hors scellements)

Au droit des sections courantes des descenderies dans l'USC et l'UT sont représentées de la même manière qu'au droit des noyaux argileux, c'est-à-dire avec une ZFD en situation de référence et en situation enveloppe (Tableau 5.1-2).

Représentation des ouvrages dans l'UA (hors scellements)

Les ouvrages hors scellements de l'UA (alvéoles de stockage, section courante des galeries et LSF) sont représentés pareillement au « *What-if* » de Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface (cf. section 5.1.2.2), à savoir :

- la ZFC présente une perméabilité à l'eau représentative d'une cicatrisation hydraulique « efficace » dégradée de quatre ordres de grandeur ;
- la ZFD est représentée avec une perméabilité conservative.

5.1.2.4 Conceptualisation des « *What-if* » de dysfonctionnement des scellements

La conceptualisation physique et numérique des « *What-if* » de dysfonctionnement des scellements est identique à celle du SEN (cf. chapitre 2.1).

La liste des radionucléides retenue est celle du SEN. Le relâchement des radionucléides et leur transfert depuis les colis déchets sont représentés de la même manière que dans le SEN.

Les propriétés de rétention et de transfert du noyau argileux, de la ZFC et de la ZFD sont identiques à celles définies pour le SEN, en situation de référence et en situation « enveloppe ».

La ZFC au droit des alvéoles HA affectée par la perturbation alcaline provenant du matériau de remplissage en extrados du chemisage est traitée en considérant l'absence de cicatrisation hydraulique (perméabilité équivalente à celle d'un sable).

Les propriétés hydrauliques du noyau argileux et des argilites initialement endommagées (ZFC et ZFD) sont dégradées par rapport à celles du SEN et sont résumées au Tableau 5.1-2.

5.1.3 Traitement des « What-if » de dysfonctionnement des scellements

Les mêmes indicateurs que pour le SEN sont retenus, à savoir :

- les temps de transfert et la capacité de drainage du stockage : ces indicateurs permettent d'évaluer les temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien et dans les galeries à partir de chaque quartier. Ces indicateurs permettent d'apprécier la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » ;
- les quantités de radionucléides transitant par la voie ouvrages et migrant par le Callovo-Oxfordien. Ces indicateurs permettent d'apprécier la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ».

L'impact radiologique est évalué uniquement pour le scénario « What-if » de Dysfonctionnement de tous les scellements, ce scénario étant jugé enveloppe par rapport aux deux autres.

Tableau 5.1-2 : Scénarios « What-if » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture - Valeur des perméabilités (m/s) des argilites endommagées mécaniquement et valeurs dégradées dans le cadre des What-if sont ombrées

Unité	Zone d'argilites endommagées	Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	What-if scellements des LSF	What-if scellements de galerie	What-if tous les scellements	SEN	What-if scellements des LSF	What-if scellements de galerie	What-if tous les scellements
Noyau argileux	Scellements des galeries	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸
	Scellements des LSF	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸
UA	ZFC au droit des zones de dépose	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
	ZFC au droit du revêtement	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
	ZFD	N/A	N/A	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰
USC/UT	ZFC au droit du noyau	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	ZFC au droit du revêtement	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	ZFD	N/A	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹

La ZFC au droit des alvéoles HA affectée par la perturbation alcaline est traitée en considérant l'absence de cicatrization hydraulique (perméabilité équivalente à celle d'un sable).

Les propriétés de rétention et de transfert du noyau argileux, de la ZFC et de la ZFD sont identiques à celles définies pour le SEN, en situation de référence et en situation enveloppe.

5.1.4 Résultats des « What-if » de dysfonctionnement des scellements

Les résultats sont analysés en regard de ceux du SEN et des SEA de dysfonctionnement des mêmes composants.

5.1.4.1 Analyse des effets sur les circulations d'eau dans le stockage

L'analyse est détaillée ci-après pour chacun des scénarios.

What-if « Dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau et par l'interface »

Avec les données de la situation de référence du SEN, le scénario de dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau argileux et par l'interface conduit à des débits d'eau à la sortie des

ouvrages de LSF de l'ordre de 4 m³ par an (cf. Tableau 5.1-3). Ces débits sont 700 fois supérieurs à ceux obtenus en situation de référence du SEN et 16 fois supérieurs à ceux du SEA « dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface ».

L'efficacité des scellements de galeries induit des pertes de charge importantes de part et d'autre des scellements (cf. Figure 5.1-3), ce qui limite les vitesses d'écoulement en sortie du quartier MA-VL (accroissement d'un facteur 1,5 par rapport SEA et de 3 par rapport au SEN).

Avec les données de la situation enveloppe du SEN, l'analyse des résultats souligne :

- une propagation de la charge hydraulique de l'Oxfordien calcaire jusqu'à la base des scellements de galeries (Figure 5.1-3), qui favorise des écoulements d'eau vers la zone principale et conduit à des débits d'eau de l'ordre 5 m³ par an en sortie des LSF ;
- d'importantes pertes de charges (jusqu'à 4 m) de part et d'autre des scellements de galerie du fait de leur efficacité;
- des vitesses d'écoulement d'eau (vitesse de pore) dans les galeries plus importantes qu'en situation de référence, en lien avec le caractère « enveloppe » des différents paramètres hydrauliques. La vitesse de pore atteint 30 mm par an en sortie de quartier MA-VL (Tableau 5.1-3), soit 10 fois plus que pour le SEN en situation « enveloppe » et 20 fois plus que pour le What-if en situation de référence. Cette vitesse de pore est sensiblement identique à celle obtenue pour le SEA « Scellements des LSF défaillants par l'interface » (cf. Tableau 5.1-3), car le comportement hydraulique du stockage est alors déterminé par la perméabilité des scellements de galerie efficaces.

What-if « Dysfonctionnement des scellements de galerie par le noyau et par l'interface »

L'analyse des résultats présentés au Tableau 5.1-3 et à la Figure 5.1-3 conduit aux remarques suivantes :

- les évaluations réalisées avec les données de la situation de référence du SEN montrent que l'efficacité des scellements des LSF suffit à limiter les débits d'eau en sortie du stockage. En effet, les débits d'eau en sortie des ouvrages de LSF atteignent 5 litres par an, valeur similaire à celle obtenue avec tous les scellements efficaces (SEN : 6 litres par an) et supérieure à celle du SEA « dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface » (1 litre par an).
- le dysfonctionnement des scellements de galerie provoque une perturbation hydraulique dans les ouvrages de stockage. La vitesse d'écoulement en sortie de quartier MA-VL est égale à celle du SEA « dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface », mais elle est significativement supérieure à celle obtenue pour le SEN (facteur 15 environ) ;
- avec les données de la situation « enveloppe » du SEN, des débits d'eau en sortie des LSF inférieurs à ceux du SEN, du fait de circulations d'eau favorisées au sein des ouvrages de stockage selon le gradient hydraulique horizontal de l'Oxfordien calcaire (écoulements orientés vers le Nord, de la zone MA-VL vers la zone HA). Les vitesses de pores en sortie de quartier MA-VL sont égales à celles du SEA « dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface » (cf. Tableau 5.1-3) et plus élevées que celles du SEN (facteur 4,5 environ).

What-if « Dysfonctionnement de tous scellements par le noyau et par l'interface »

La charge hydraulique de l'Oxfordien sus-jacent se propage depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux quartiers et alvéoles de stockage. Ce phénomène est très accentué en situation « enveloppe » (cf. Figure 5.1-3).

Avec les données de la situation de référence du SEN, le dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface conduit à des débits d'eau en sortie des LSF de l'ordre de 6,2 m³ par an, provenant à la fois de la zone principale et des quartiers de stockage (essentiellement MA-VL). Ce débit est du même ordre de grandeur que celui du « *What-if* » de dysfonctionnement des scellements des LSF, mais il est significativement plus élevé qu'en SEN (facteur 1000 environ) et qu'en SEA « dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » (facteur 12 environ). C'est lié principalement à la perméabilité des scellements des LSF. Les vitesses d'écoulement en sortie du quartier MA-VL sont doublées par rapport au « *What-if* » de dysfonctionnement des scellements de galerie.

Les évaluations réalisées avec les données de la situation « enveloppe » du SEN montrent que la perte de charge induite par l'Oxfordien se propage dans l'ensemble du stockage et engendre un transfert par convection importants des radionucléides des quartiers de stockage vers les liaisons surface-fond. Les débits d'eau provenant de la zone principale et des quartiers de stockage HA et MA-VL sont ainsi de l'ordre de 8,5 m³ par an.

Les résultats montrent que sur le plan hydraulique, le système de stockage présente une certaine robustesse pour la plupart des scénarios « What-if » étudiés. En effet, seul le scénario « What-if » de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements (reposant sur les hypothèses « enveloppes » du SEN) engendre un effet important en propageant la charge hydraulique de l'Oxfordien sus-jacent dans le stockage. L'effet de cette propagation reste néanmoins limité pour ce qui est du transfert des radionucléides, du fait des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien et de l'architecture borgne du stockage.

Tableau 5.1-3 : Scénarios « What-if » - Débits d'eau sortant des LSF et vitesses d'écoulement en sortie de quartier MA-VL (hypothèses de la situation de référence et de la situation enveloppe)

Scénario	Débit hydraulique sortant des LSF (L/an)		Vitesse d'écoulement en sortie de quartier MA-VL (mm/an)	
	Situation de référence	Situation enveloppe	Situation de référence	Situation enveloppe
SEN (tous scellements efficaces)	6	70	0,5	6
What-if « Dysfonctionnement des scellements des LSF »	4200	4900	1,5	30
What-if « Dysfonctionnement des scellements de galerie »	5	50	7,5	28
What-if « Dysfonctionnement de tous les scellements »	6200	8500	15	70

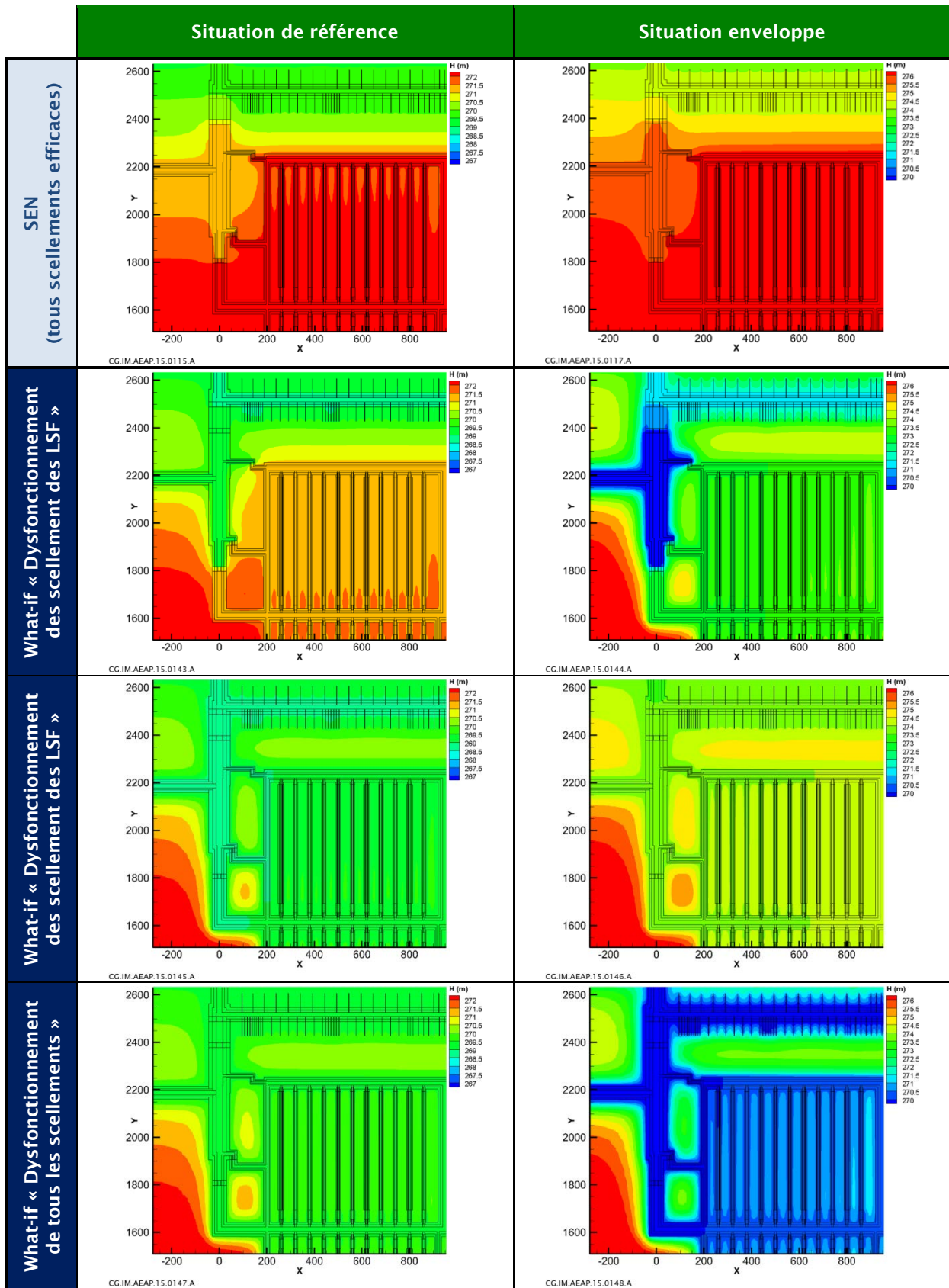


Figure 5.1-3 : SEN et « What-if » dysfonctionnement des ouvrages de fermeture, en situation de référence (gauche) et en situation enveloppe (droite) - Champ de charges hydrauliques (m) dans la zone MA-VL.

5.1.4.2 Analyse des scénarios What-if vis-à-vis des circulations d'eau et du transfert des radionucléides

Le transfert de l'iode 129

La Figure 5.1-4 ci-dessous représente les processus de transfert dominants dans les galeries principales, les liaisons surface-fond et au travers du Callovo-Oxfordien, pour le SEN et chacun des scénarios « *What-if* » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture étudiés :

- en cas de dysfonctionnement des scellements des LSF, la convection est dominante dans les LSF et il y a codominance de la diffusion et de la convection dans les galeries. Avec les données de la situation enveloppe du SEN, la convection est dominante dans les galeries ;
- en cas de dysfonctionnement des scellements de galerie, la convection est dominante dans les galeries et la diffusion est dominante dans les LSF ;
- en cas de dysfonctionnement de tous les scellements, la convection est dominante dans tous les ouvrages.

Seul le « *What-if* » de dysfonctionnement de tous les scellements conduit à une convection dominante tout le long de la voie de transfert ouvrage. Dans ce cas, la circulation de l'eau engendre un débit molaire en sortie des LSF plus important et plus précoce.

La Figure 5.1-5 ci-dessous présente les débits molaires d'iode 129 entrant ou sortant dans différents endroits au long de la voie de transfert par les ouvrages, pour le « *What-if* » de dysfonctionnement de tous les scellements.

Les résultats des scénarios « *What-if* » de dysfonctionnement des LSF et de dysfonctionnement des galeries montrent que le maximum de débit molaire sortant des LSF est atténué d'environ un facteur 100 par rapport à celui en sortie des alvéoles MA-VL. Cette atténuation est du même ordre de grandeur que celle du SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface.

Seuls les résultats du « *What-if* » de dysfonctionnement de tous les scellements montrent une atténuation moindre, de l'ordre d'un facteur 20 par rapport à celui en sortie des alvéoles MA-VL, avec une date d'occurrence du maximum de débit d'environ 100 000 ans (avec les données de la situation de référence du SEN) ou 15 000 ans (avec les données de la situation enveloppe du SEN).

L'iode 129 qui sort des LSF provient essentiellement des quartiers MA-VL. Les résultats indiquent que les gradients de charge hydraulique dans le stockage tendent à limiter le transfert par convection des radionucléides issus des zones HA et à augmenter celui des radionucléides provenant du quartier MA-VL (dont la répartition de l'inventaire en iode 129 est prise de manière conservatrice en entrée de quartier).

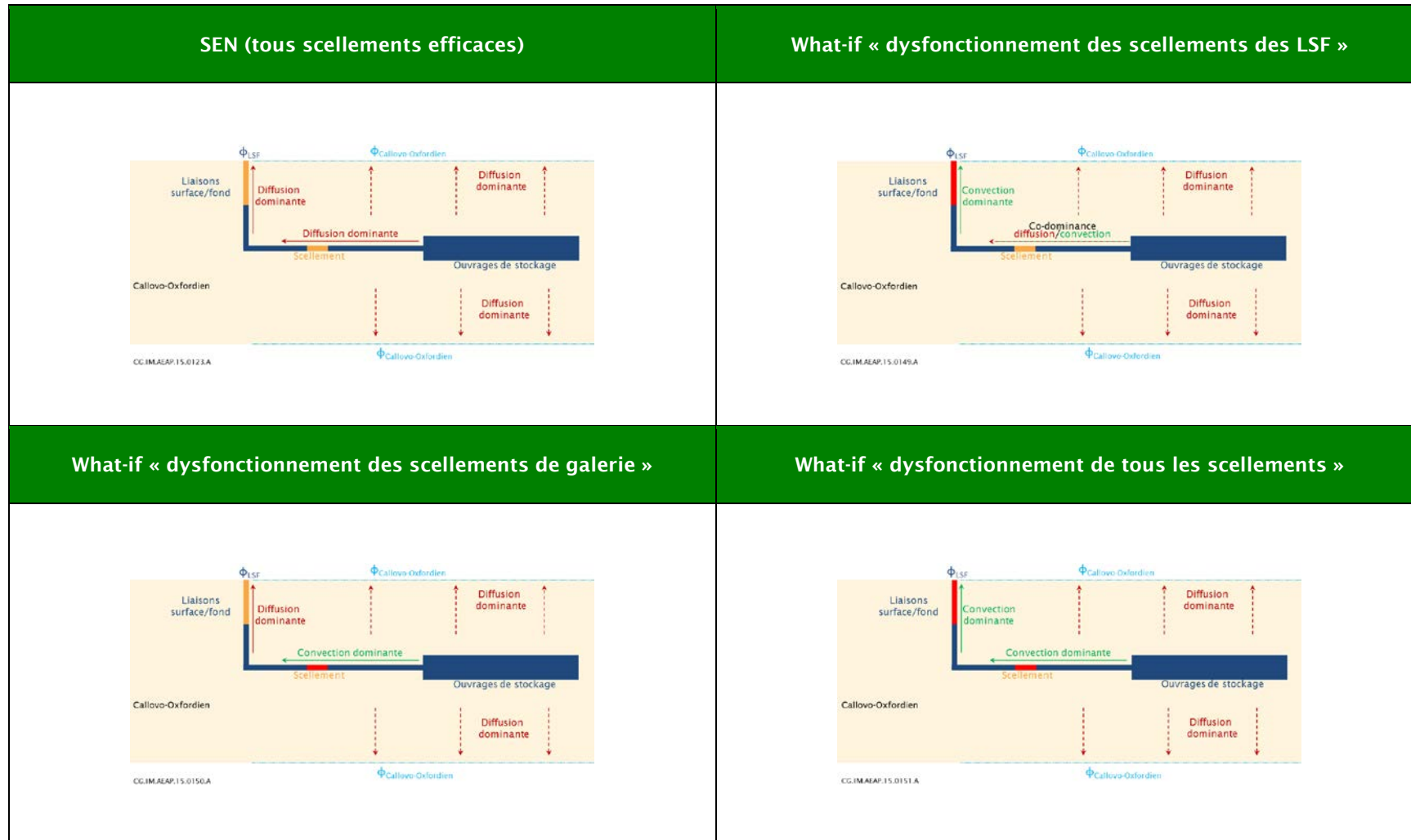


Figure 5.1-4 : SEN et scénarios What-if de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (situation de référence du SEN) -Processus de transfert des solutés au sein des composants ouvragés et au sein du Callovo-Oxfordien

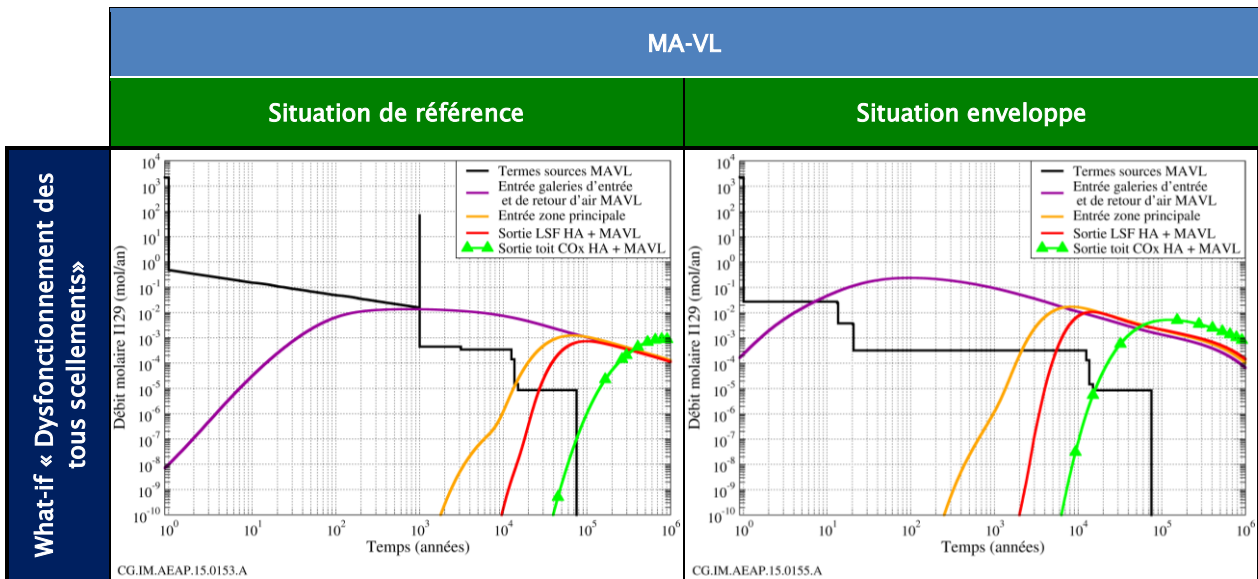


Figure 5.1-5 : Scénario What-if de dysfonctionnement de tous les scellements - historique des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Le Tableau 5.1-4 présente le bilan molaire cumulé en iode 129, normé par rapport à l'inventaire initial de chaque zone, en différents endroits au long de la voie de transfert pas les ouvrages (alvéoles, quartiers HA et MA-VL, zone principale et LSF).

Pour les trois scénarios « What-if » étudiés, la quantité cumulée d'iode sortant des LSF est inférieure à celle traversant le Callovo-Oxfordien.

Tableau 5.1-4 : SEN et scénarios « What-if » de dysfonctionnement des scellements - bilan des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total HA et MA-VL) entrant dans les galeries, dans la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et des argilites au toit du Callovo-Oxfordien

		Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial de chaque zone)							
		Situation de référence				Situation Enveloppe			
		SEN	What-if scellements LSF	What-if scellements galeries	What-if tous scellements	SEN	What-if scellements LSF	What-if scellements galeries	What-if tous scellements
HA	Entrée dans les galeries d'accès	5%	5,8%	6,1%	6,1%	5,8%	8,2%	3,6%	11,3%
	Entrée dans les galeries de liaison	0,2%	0,3%	<0,1%	<0,1%	0,4%	1,7%	<0,1%	5,6%
	Entrée dans la zone principale	<10 ⁻² %	<10 ⁻² %	<10 ⁻⁴ %	<10 ⁻⁵ %	<10 ⁻² %	0,7%	<10 ⁻⁴ %	4,8%
MA-VL	Entrée galeries liaison (accès / retour d'air)	10%	10%	17%	25%	18%	26%	31%	43%
	Entrée dans la zone principale	0,4%	1,2%	7,8%	16%	5,1%	26%	25%	44%
HA + MA-VL	Sortie des LSF	10 ⁻³ %	<0,1%	<0,1%	5,5%	0,2%	8,8%	1,0%	20%
	Sortie toit du Callovo-Oxfordien	11%	11%	11%	10%	56%	51%	55%	45%

La Figure 5.1-6 ci-dessous présente l'historique des débits molaires d'iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien dans les scénarios « What-if » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture et dans le SEN. Le Tableau 5.1-5 précise les valeurs des débits molaires maximaux et leurs dates d'occurrence.

L'analyse des résultats selon les données prises en compte (situation de référence ou situation enveloppe du SEN) conduit aux remarques suivantes :

- avec les données de la situation de référence du SEN, l'iode 129 issue des zones HA transite principalement par le Callovo-Oxfordien, moins de 0,01% de l'inventaire initial atteint la zone principale.
- avec les données de la situation enveloppe du SEN, le dysfonctionnement des scellements des LSF provoque des écoulements d'eau orientés des quartiers HA vers les liaisons surface-fond et un transfert convectif de l'iode 129 qui concerne 0,7% de l'inventaire initial des quartiers HA avec des scellements de galerie efficaces et 4,8% en cas de défaillance de tous les scellements ;
- le dysfonctionnement de tous les scellements conduit à un transfert significatif de l'iode 129 par la voie ouvrages : 5,5% de l'inventaire initial avec les données de la situation de référence du SEN et 20 % de l'inventaire initial avec les données de la situation enveloppe du SEN ;
- la quantité d'iode 129 qui migre par le Callovo-Oxfordien est peu affectée par la défaillance des scellements en situation de référence. En situation « enveloppe », la quantité d'iode 129 qui transite par les ouvrages diminue significativement la quantité d'iode 129 migrant par le Callovo-Oxfordien mais celle-ci reste majoritaire ;
- le transfert par la voie ouvrages se différencie de celui de la voie Callovo-Oxfordien par une date d'occurrence du débit maximal plus précoce (cf. Figure 5.1-5 et Figure 5.1-6) ;
- en raison du gradient de charge dans l'Oxfordien favorable à la circulation d'eau vers le nord du stockage, la défaillance des scellements accroît le transfert convectif de l'iode 129 de la zone MA-

VL vers la zone principale, soit en terme de quantité de 0,4 % à 16 % avec les données de la situation de référence du SEN et de 5 % à 44 % avec les données de la situation « enveloppe » du SEN.

Les résultats associés aux données de la situation de référence du SEN montrent que :

- le maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des ouvrages de liaison surface-fond est inférieur à celui par la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien, d'un facteur supérieur à deux ordres de grandeur en cas de dysfonctionnement des scellements des LSF ou des galeries ;
- que seul le scénario de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements conduit à un niveau du maximum de débit molaire d'iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond du même ordre de grandeur que celui de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien:
 - ✓ avec une date d'occurrence de 100 000 ans (contre 840 000 ans pour la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien) ;
 - ✓ avec des débits molaires supérieurs à ceux de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien pendant environ 300 000 ans.

Les résultats associés aux données de la situation « enveloppe » du SEN montrent que :

- le scénario « *What-if* » de dysfonctionnement des scellements de LSF conduit
 - ✓ à un débit molaire d'iode 129 en sortie des LSF supérieur à celui en sortie du Callovo-Oxfordien pendant 30 000 ans ;
 - ✓ à un maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond inférieurs à celui en sortie des argilites d'un facteur 5.
- le scénario « *What-if* » de dysfonctionnement des scellements de galerie conduit :
 - ✓ à un débit molaire d'iode 129 en sortie des LSF supérieur à celui en sortie des argilites pendant environ 15 000 ans ;
 - ✓ à un maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond inférieurs à celui en sortie des argilites d'un facteur 30.
- le scénario de « *What-if* » de défaillance de l'ensemble des scellements conduit :
 - ✓ à un débit molaire d'iode 129 en sortie des LSF supérieur à celui en sortie des argilites pendant environ 50 000 ans ;
 - ✓ à un maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond supérieur à celui en sortie des argilites d'un facteur 2 ;
 - ✓ une date d'occurrence de ce maximum atteinte vers 15 000 ans ;

L'ensemble de ces résultats montre une robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement « *What-if* » d'un groupe de scellements (LSF ou galeries). Pour ces deux scénarios « *What-if* », les sorties au toit du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages sont avancées pendant quelques milliers d'années par rapport à la sortie par le Callovo-Oxfordien. Le maximum de débit molaire reste inférieur à celui-ci en sortie du Callovo-Oxfordien.

Seul le scénario « *What-if* » de dysfonctionnement de tous les scellements considérant les hypothèses conservatives de la situation enveloppe du SEN conduit à un débit molaire maximum en sortie des LSF légèrement supérieur (facteur 2) et à une date d'occurrence avancée d'environ 50 000 ans par rapport à la sortie toit du Callovo-Oxfordien.

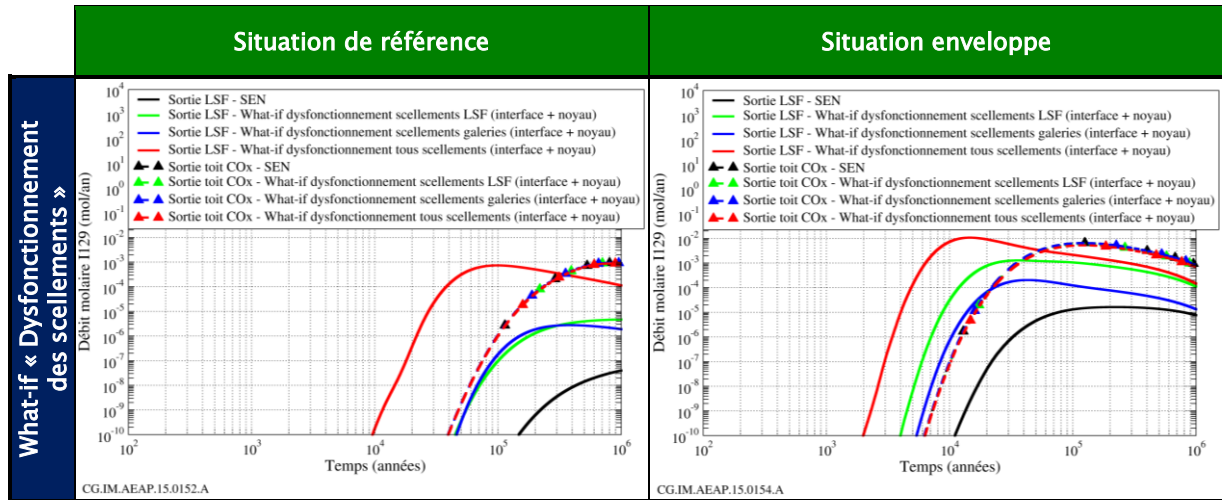


Figure 5.1-6 : Scénarios « What-if » de dysfonctionnement des scellements - Historique des débits molaires d'iode 129 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et des argilites au toit du Callovo-Oxfordien

Tableau 5.1-5 : Scénarios « What-if » de dysfonctionnement des scellements - Débits molaires d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien : Débit molaire maximum, date d'occurrence et rapport entre les maxima par la voie ouvrage et la voie argilites

		Débits molaires maximum d'iode 129							
		Situation de référence				Situation Enveloppe			
		SEN	What-if scellements LSF	What-if scellements galeries	What-if tous scellements	SEN	What-if scellements LSF	What-if scellements galeries	What-if tous scellements
Transfert par les argilites	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10 ⁻⁶ moles/an)	930	930	930	880	6500	6000	6500	5300
	Date d'occurrence (milliers d'années)	840	840	840	840	120	120	120	120
Transfert par la voie ouvrages	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10 ⁻⁶ moles/an)	0,04	4,7	2,8	740	16	1300	210	11000
	Date d'occurrence (milliers d'années)	>1000	>1000	380	100	220	36	43	15
Rapport des maxima de débit molaire voie argilites / voie ouvrages		23 000	200	340	1,2	400	4,6	32	0,5

Le transfert du chlore 36

Le transfert du chlore 36 par la voie ouvrages et par les argilites est présenté à la Figure 5.1-7.

Globalement les résultats montrent un comportement similaire à celui de l'iode 129 avec des ordres de grandeurs différents.

Ainsi sur la base des résultats associés aux données de la situation « enveloppe » du SEN, il ressort pour le scénario What-if de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements :

- un débit molaire de chlore 36 en sortie des LSF supérieur à celui en sortie du Callovo-Oxfordien pendant environ 40 000 ans ;
- puis à des maxima de débit molaire de chlore 36 en sortie des liaisons surface-fond inférieur aux maxima de débit molaire en iode 129 en sortie du Callovo-Oxfordien d'environ un facteur 2 ;
- une date d'occurrence de ce maximum vers 25 000 ans.

Le maximum de débit molaire de chlore 36, bien qu'avancé à 100 000 ans en sortie des LSF, reste inférieur à celui des argilites à celui au toit du Callovo-Oxfordien. Ce résultat est lié à la période radioactive du chlore 36, inférieure au temps de transfert dans l'ensemble du réseau de galeries permettant une décroissance radioactive pendant sa migration.

Les autres radionucléides

Les historiques des débits molaires au toit du Callovo-Oxfordien en cas de dysfonctionnement « *What-if* » de tous les scellements, évalués avec les données de la situation de référence et de la situation enveloppe du SEN, sont tracés à la Figure 5.1-8.

Par rapport au SEN, avec les données relatives à la situation de référence, les dates d'occurrence des débits molaires supérieurs à la valeur de 10^{-10} mol/an sont avancées pour l'iode 129, le chlore 36, le sélénium 79, et l'aluminium 26 ; néanmoins les débits molaires maximaux étant pilotés par la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien. Ils sont similaires à ceux obtenus pour le SEN.

Concernant les résultats obtenus avec les données de la situation enveloppe du SEN, les radionucléides présentant des débits molaires supérieurs à 10^{-10} mol/an sont en plus de l'iode 129 et du chlore 36, mobiles, le calcium 41, le potassium 40, faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et dans les argilites, le molybdène 93, mobile à vie moyenne, et les uraniums 235 et 238, peu solubles dans les argilites avec un inventaire important.

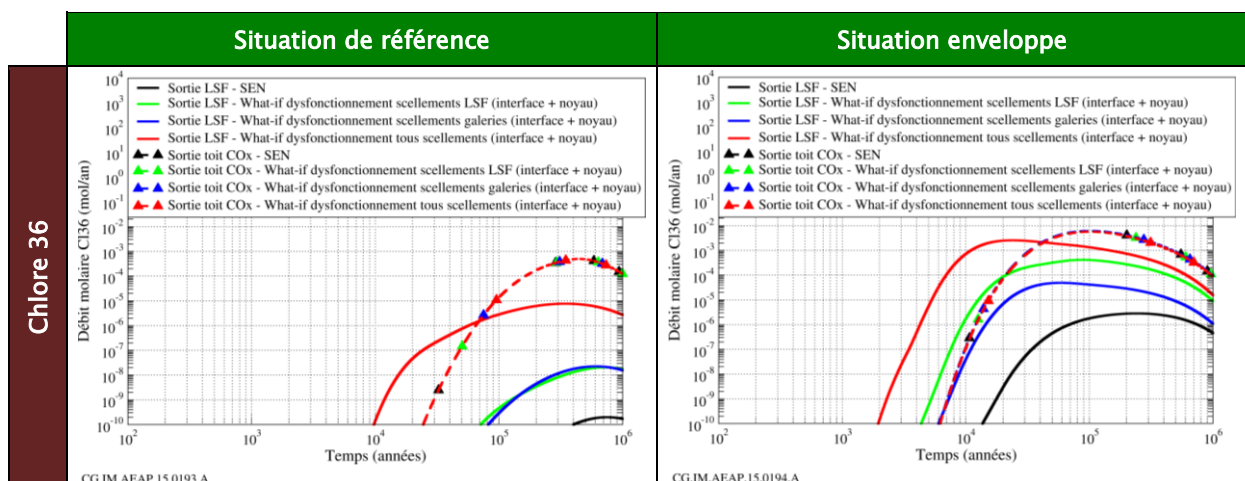


Figure 5.1-7 : *SEN et scénario « What-if » de dysfonctionnement des scellements (situations de référence et enveloppe) - historique des débits molaires de chlore 36 sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du toit du Callovo-Oxfordien -*

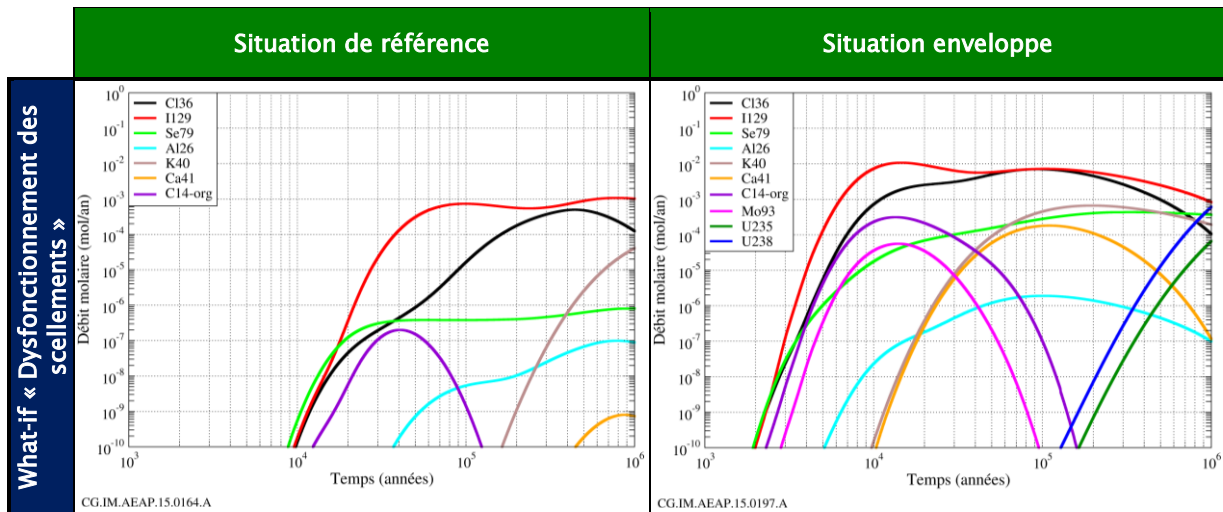


Figure 5.1-8 : Scénario « What-if » de dysfonctionnement de tous les scellements (situations de référence et enveloppe) - historique des débits molaires des radionucléides dont le débit molaire cumulé au toit du Callovo-Oxfordien excède 10^{10} moles par an

5.1.4.3 Évaluation de l'impact du scénario « What-if » de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface et le noyau argileux

L'impact radiologique est évalué à l'exutoire du Barrois avec les mêmes hypothèses de transferts dans la biosphère que pour le SEN.

Les évolutions de doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée et une biosphère chaude sont présentées en Figure 5.1-9. Le Tableau 5.1-6 indique les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces maxima.

Les résultats n'indiquent pas de différences significatives entre la biosphère tempérée et la biosphère chaude.

Les évaluations réalisées d'après les données de la situation de référence du SEN montrent que la dose engendrée par le scénario « What-if » de tous les scellements reste du même ordre de grandeur que celle du SEN (situation de référence).

Les évaluations reposant sur la base des données de la situation enveloppe du SEN montrent que l'impact est du même ordre de grandeur que celui en SEN et en SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Le maximum de dose est de l'ordre de 0,002 millisievert par an à environ 350 000 ans ce qui reste faible. Elle est pilotée par le chlore 36, le sélénium 79, et l'iode 129. Seul le sélénium 79 a une contribution à l'impact significativement plus élevée qu'en SEN.

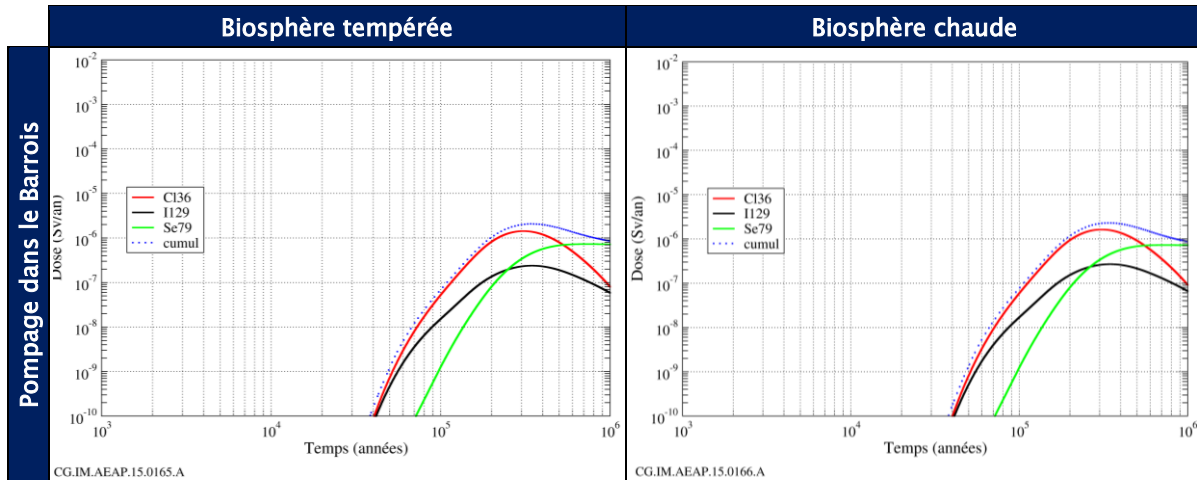


Figure 5.1-9 : Scénario « What-if » dysfonctionnement de tous les scellements (situation enveloppe) : historique des doses à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude

Tableau 5.1-6 : SEN et scénario « What-if » dysfonctionnement de tous les scellements - doses maximales à l'exutoire « pompage dans le Barrois » pour les biosphères tempérée et chaude (situation enveloppe) et date d'occurrence des doses maximales

RN	SEN (tous scellements efficients)				What-if « Dysfonctionnement de tous les scellements »			
	Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)
³⁶ Cl	1,2.10 ⁻⁰³	320	1,4.10 ⁻⁰³	320	1,4.10 ⁻⁰³	310	1,6.10 ⁻⁰³	310
¹²⁹ I	2,1.10 ⁻⁰⁴	380	2,3.10 ⁻⁰⁴	380	2,4.10 ⁻⁰⁴	350	2,7.10 ⁻⁰⁴	350
⁷⁹ Se	3,7.10 ⁻⁰⁴	730	4,4.10 ⁻⁰⁴	730	7,3.10 ⁻⁰⁴	730	7,3.10 ⁻⁰⁴	730
Cumul	1,6.10 ⁻⁰³	340	1,9.10 ⁻⁰³	340	2,1.10 ⁻⁰³	350	2,3.10 ⁻⁰³	340

5.1.5 Enseignements des scénarios « What-if » de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture

Du point de vue du comportement hydraulique, les enseignements sont similaires à ceux des SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture par l'interface (chap. 3.1), à savoir :

- des effets limités dans les liaisons surface-fond pour les configurations pour lesquelles les scellements des LSF ou les scellements de galerie restent efficients ;
- des effets sur le régime hydraulique limités en cas de scénario « What-if » de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements en raison de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et de l'architecture borgne du stockage ;
- un écoulement lent dans les galeries principales du stockage, orienté des quartiers au sud (MA-VL) vers les quartiers au nord du stockage (HA), en lien avec le gradient de charge horizontale de l'Oxfordien calcaire;

- avec les données de la situation de référence, en cas de dysfonctionnement de tous les scellements, des débits d'eau en sortie des LSF sont limités environ 6,2 m³ par an et les vitesses d'écoulement (vitesses de pores) sont de l'ordre de 15 mm par an dans le quartier MA-VL ;
- avec les données de la situation enveloppe du SEN, un régime hydraulique entraînant des écoulements plus importants dans le quartier MA-VL, mais néanmoins avec des débits limités dans les LSF, environ 8,5 m³ par an dans les puits et descenderies.

La comparaison des cartographies de charges hydrauliques dans le stockage, des débits d'eau sortant des puits et descenderies et des vitesses d'écoulement en sortie de quartier MA-VL pour les différentes situations étudiées en SEA et « *What-if* » de dysfonctionnement des scellements permet de souligner la robustesse du système de stockage.

Ces résultats montrent que la performance de l'un ou l'autre groupe de scellements suffit à limiter le transfert des radionucléides par la voie ouvrages.

Bien que la voie ouvrages soit sollicitée en cas de dysfonctionnement « *What-if* » de l'ensemble des scellements, le maximum de débit molaire n'apparaît en sortie des LSF qu'à 100 000 ans, permettant une atténuation du chlore 36 en situation de référence.

Le caractère borgne de l'architecture joue un rôle en cas de défaillance de tous les ouvrages de fermeture en limitant le flux d'eau par la mobilisation des caractéristiques du Callovo-Oxfordien. En situation de référence, de par leur longueur, les alvéoles MA-VL contribuent à atténuer une grande partie de l'inventaire en iode 129 relâché par les colis de déchets, bien que cette contribution soit légèrement diminuée en cas de dysfonctionnement des scellements de galerie. L'atténuation du débit molaire d'iode 129 entre l'entrée des galeries MA-VL et la zone principale est comparable à celle des SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture par l'interface : environ 3 ordres de grandeur en cas de défaillance des scellements de galerie ou des LSF et un facteur 200 en cas de dysfonctionnement de tous les ouvrages de fermeture.

Ces résultats montrent la robustesse du stockage notamment l'importance du caractère borgne de l'architecture et des propriétés hydrauliques favorables du Callovo-Oxfordien face à une défaillance de tous les ouvrages de fermeture devant concourir à augmenter la résistance hydraulique des galeries et liaisons surface-fond.

Les évaluations réalisées pour la situation de référence du SEN indiquent en cas de dysfonctionnement de tous les ouvrages de fermeture un débit molaire par la voie ouvrages supérieur à celui de la voie Callovo-Oxfordien pendant 300 000 ans. Un comportement similaire est obtenu avec la situation enveloppe du SEN mais avec une prédominance de la voie par les ouvrages pendant environ 50 000 ans. La quantité cumulée sur un million d'années d'iode 129 qui parvient au toit du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages est néanmoins inférieure à 20 % de l'inventaire initial.

Les radionucléides susceptibles d'atteindre le toit du Callovo-Oxfordien sont les mêmes que pour le SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture par l'interface. Ce sont les anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79 et aluminium 26), et d'autres radionucléides moins mobiles (potassium 40 et Calcium 41) et le carbone 14 organique.

La dose à l'exutoire de pompage dans le Barrois est de l'ordre de 0,002 millisievert par an. Cet impact est similaire à celui du SEN (situation enveloppe) et très inférieur aux effets déterministes. La dose à l'exutoire en limite Est de la zone de Fracturation diffuse au niveau du Dogger est similaire à celle du SEN ; le dysfonctionnement des scellements a peu d'incidence sur cette voie de transfert.

5.2 Les scénarios « *What-if* » de dysfonctionnement des conteneurs de stockage

5.2.1 Rappel des scénarios retenus

L'analyse des risques et incertitudes décrite dans le chapitre 1 du présent volume conduit à définir le scénario What-if de défaillance de tous les conteneurs de stockage HA (HA0, HA1/HA2) (cf. Tableau 1.7-2).

Ce chapitre présente la description et la conceptualisation du scénario puis les résultats des évaluations quantitatives des indicateurs retenus.

5.2.2 Description et conceptualisation du scénario « *What-if* » de défaillance de tous les conteneurs de stockage HA (HA0, HA1/HA2)

Ce scénario considère la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage HA (i.e. HA0, HA1/HA2) selon un processus similaire à celui retenu pour le SEA, à savoir une corrosion oxydante liée à la présence d'oxygène dans l'alvéole HA.

Il diffère du SEA par le nombre de conteneurs impactés, considérant l'hypothèse très peu vraisemblable que tous les conteneurs sont défaillants dès la fermeture du stockage. Le relâchement des radionucléides est initié dès cette date.

Les effets induits de la perte d'étanchéité sur les modèles de relâchement sont les mêmes que pour le SEA, à savoir la prise en compte d'un environnement cimentaire dans l'alvéole.

Ces effets induits conduisant à un relâchement des radionucléides dans un milieu présentant une charge thermique plus importante que dans le SEN, les caractéristiques de transport et rétention des radionucléides sont pris en compte de manière similaire à celle du SEA en tenant compte de la thermicité des familles HA1 et HA2¹²⁷.

Les autres hypothèses et valeurs de paramètres sont équivalentes à celles retenues dans le scénario d'évolution normale. Ainsi, la conceptualisation physique du « *What-if* » est la même que celle associée au SEN en tenant compte des effets induits par la perte d'étanchéité des conteneurs de stockage.

Les radionucléides retenus pour l'évaluation quantitative de ce scénario sont les mêmes que ceux du SEN.

La représentation schématique du scénario « *What-if* » est similaire à celle du SEA présentée en Figure 3.2-1.

5.2.3 Traitement du scénario « *What-if* » de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA

Seuls les indicateurs intermédiaires sont quantifiés :

- le débit molaire en entrée et sortie des composants ouvragés en considérant la voie de transfert par les ouvrages, et ce jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien ;
- le débit molaire en sortie du toit du Callovo-Oxfordien en considérant la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien ;
- la date d'occurrence du maximum des sorties « ouvrages » et au toit et au mur du Callovo-Oxfordien.

¹²⁷ Par exemple, sur la base d'évaluations préparatoires, pour les familles HA1 et HA2, le facteur appliqué au coefficient de diffusion effectif dans le Callovo-Oxfordien atteint une valeur maximale de 2,8 à 600 ans sur quelques mètres autour des alvéoles HA.

5.2.4 Résultats du scénario « What-if » de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA

5.2.4.1 Effets de la perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage sur les termes sources et le comportement hydraulique

La considération d'un milieu cimentaire conduit à un relâchement des radionucléides sur une année pour l'ensemble de l'inventaire, que ce soit pour le scénario « What-if » comparé à la situation de référence, ou comparé à la situation « enveloppe » (cf. Figure 5.2-1).

Le relâchement peut être considéré comme labile pour l'ensemble des colis de déchets HA dans ce scénario.

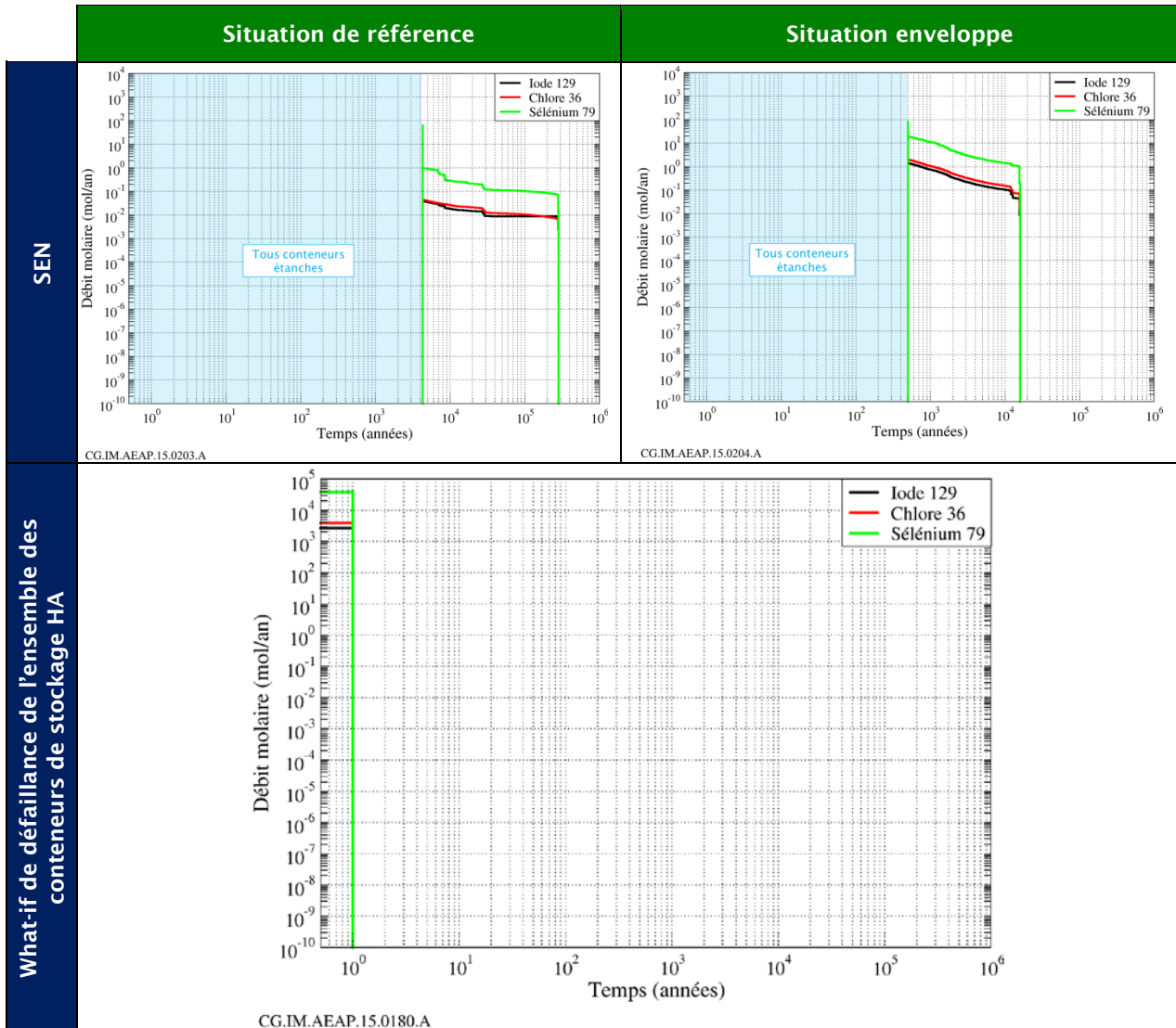


Figure 5.2-1 : Situation enveloppe du SEN et scénario « What-if » de défaillance de tous les conteneurs de stockage HA - termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79.

En lien avec l'élévation de température, l'augmentation temporaire et très locale de la perméabilité ne modifie pas le schéma hydraulique d'écoulement au sein des ouvrages et dans le Callovo-Oxfordien pour ce scénario.

Les résultats sont identiques au SEN du point de vue hydraulique, que ce soit pour la situation de référence ou la situation enveloppe.

5.2.4.2 Évaluations quantitatives des transferts

Sur la base de la situation de référence du SEN

▪ **Transfert par les ouvrages (galeries et liaisons surface-fond remblayées et scellées)**

Par rapport au SEN et au SEA, le débit molaire maximum entrant dans les galeries est augmenté d'un facteur 10 à 100 environ.

L'influence d'un terme source labile, et dans une moindre mesure, de la thermique, sont masquées par les durées de transfert dans les galeries qui sont de l'ordre de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers d'années (cf. Figure 5.2-2). Par conséquent, les débits molaires maxima des radionucléides entrant dans les galeries de liaison sont augmentés au plus d'un facteur 2 par rapport à ceux du scénario d'évolution normale. Les débits molaires maxima arrivant dans la zone principale et sortant des LSF sont similaires pour tous les scénarios étudiés (SEN, SEA et « *What-if* »).

L'effet d'un terme source labile conduit à favoriser un peu plus la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien : la quantité d'iode 129 sortant par cette voie de transfert correspond à environ 14 % de l'inventaire initial pour environ 11 % pour le scénario d'évolution normale, mais avec des maxima et des dates d'occurrence de maxima identiques entre tous les scénarios.

Les conséquences liées à la défaillance prématurée des conteneurs de stockage (terme source labile, transitoire thermique) restent ainsi négligeables (Figure 5.2-2 et Tableau 5.2-1).

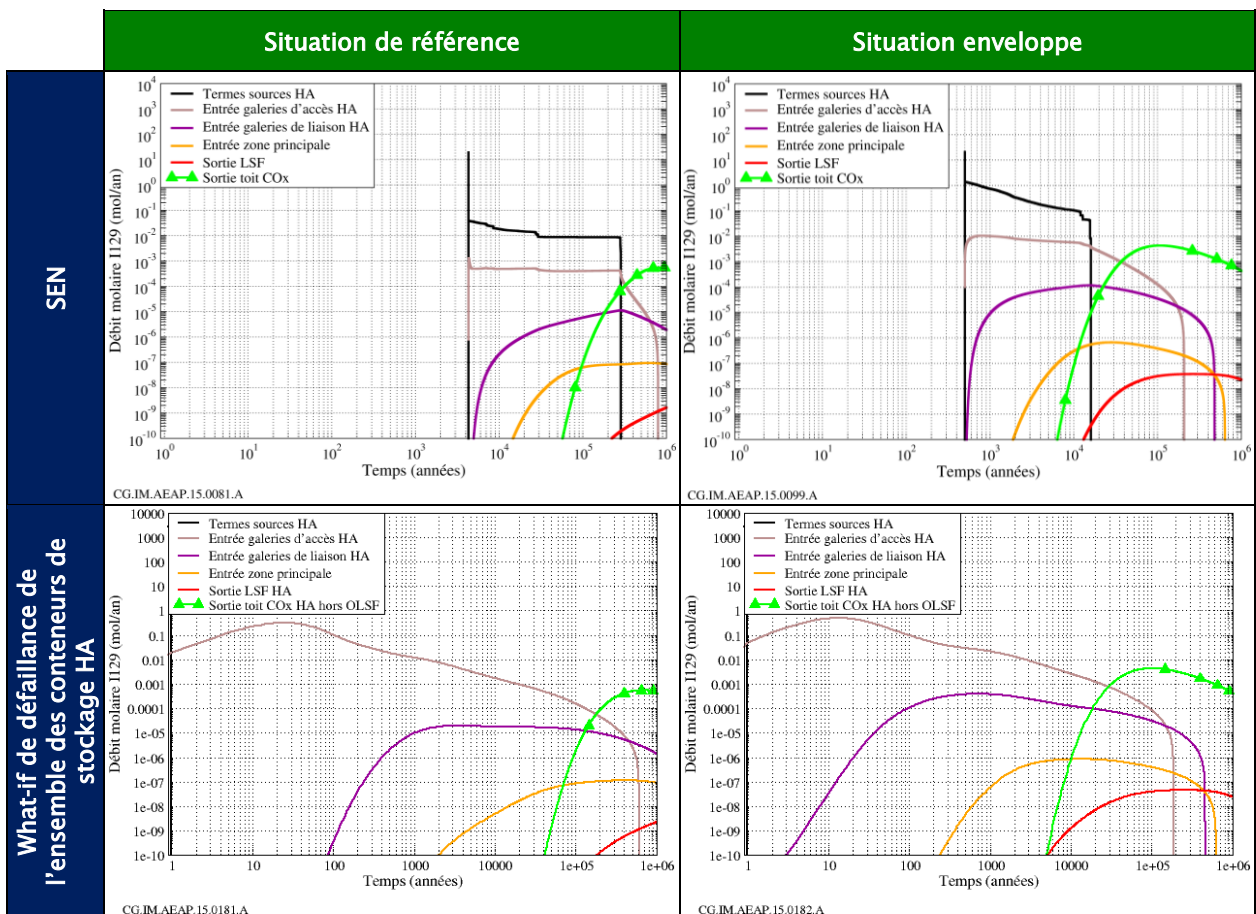


Figure 5.2-2 : Scénario « *What-if* » de défaillance des conteneurs de stockage HA comparé au SEN : historique des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries les galeries, la zone principale, et sortant des ouvrages de liaison surface-fond.

Tableau 5.2-1 : Scénario « What-if » de défaillance des conteneurs de stockage du quartier HA0 - situation de référence : bilan de la quantité d'iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) à 1 million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Quantité d'iode 129 à 1 million d'années (en % de l'inventaire total initial de chaque zone)					
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone principale	Sortie des LSF	Sortie du toit du Callovo-Oxfordien
SEN (référence)	5.0 %	0,2 %	< 10 ⁻² %	< 10 ⁻⁴ %	11,3 %
What-if	5,1 %	0,2 %	< 10 ⁻² %	< 10 ⁻⁴ %	14,2 %

Les résultats montrent que la voie de transfert principale reste le Callovo-Oxfordien. Cette prépondérance s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries du fait de l'efficacité des scellements et de la longueur hectométrique de l'alvéole HA et donc un transfert par diffusion dominante dans et autour de l'alvéole HA.

A l'échelle du quartier, le transfert long et limité des radionucléides par diffusion dans les galeries permet un échange de masse important depuis les galeries vers le Callovo-Oxfordien¹²⁸.

En dehors du quartier, une atténuation supplémentaire est obtenue le long des galeries de la zone principale et des liaisons surface-fond. A 1 million d'années, seulement environ 0,00001 % de l'inventaire initial en iode 129 (HA) sort des liaisons surface/fond. Les principales contributions au débit molaire sortant des ouvrages de liaison surface-fond sont les alvéoles situés en bordure de quartier HA0 et des quartiers HA1/HA2 les plus près de la zone principale.

Les temps de transfert dans les ouvrages masquent les effets d'un relâchement labile dès la perte d'étanchéité.

L'analyse des résultats est identique pour le chlore 36 (cf. Tableau 5.2-2 ci-après).

Tableau 5.2-2 : Scénario What-if de défaillance des conteneurs de stockage HA0 – Comparé au SEN situation de « référence » : bilan de la quantité en chlore 36 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) à 1 million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

Quantité de chlore 36 à 1 million d'années (en % de l'inventaire total initial de chaque zone)					
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone principale	Sortie des LSF	Sortie au toit du Callovo-Oxfordien
SEN (référence)	3,3 %	0,08 %	< 10 ⁻³ %	< 10 ⁻⁵ %	5,8 %
What-if	4,5 %	0,1 %	< 10 ⁻³ %	< 10 ⁻⁵ %	8,1 %

¹²⁸ A 1 million d'années, seulement 0,2 % de l'inventaire initial en iode 129 est sorti des quartiers HA vers les galeries de liaison, avec une atténuation du maximum de débit molaire de l'ordre de 2 ordres de grandeur par rapport au débit molaire en sortie des alvéoles.

▪ **Transfert dans le Callovo-Oxfordien**

Les trois principaux radionucléides contributeurs sont l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79.

Dans ce scénario « What-if », tout l'inventaire en HA est mobilisé par la défaillance des tous les conteneurs de stockage HA, et du fait d'un terme source qui est dans ce cas quasi labile, il ressort que :

- pour l'iode 129, les maxima de débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien et les dates d'occurrences de ces maxima sont globalement identiques à ceux du SEN et du SEA. Cependant le relâchement en sortie du Callovo-Oxfordien est plus précoce d'environ 20 000 ans ;
- pour le chlore 36, du fait de sa période versus la durée du terme source en scénario d'évolution normale, le maximum de débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien est avancé de 150 000 ans pour le scénario « What-if » par rapport au SEN et au SEA ;
- pour le sélénium 79, du fait de son relâchement imposé par sa solubilité dans les argillites, le maximum de débit molaire est identique pour tous les scénarios étudiés.

Situation enveloppe

▪ **Transfert dans les ouvrages**

Les résultats conduisent aux conclusions que celles précédentes pour la situation de référence :

- la voie de transfert principale reste le Callovo-Oxfordien. Cette prépondérance s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries du fait de l'efficacité des scellements, de la longueur hectométrique de l'alvéole HA et donc du transfert par diffusion dominant dans et autour de l'alvéole ;
- à l'échelle du quartier, le transfert long et limité des radionucléides par diffusion dans les galeries permet un échange de masse important depuis les galeries vers le Callovo-Oxfordien ;
- une atténuation supplémentaire est obtenue le long des galeries de la zone principale et des liaisons surface-fond.

Tableau 5.2-3 : SEA défaillance des conteneurs de stockage HA du quartier HAO - situation enveloppe: bilan de la quantité en iode 129 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA) à 1 million d'années entrant dans les galeries, la zone principale, sortant des ouvrages de liaison surface-fond et du Callovo-Oxfordien

	Quantité d'iode 129 à 1 million d'année (en % de l'inventaire total initial des quartiers HA)				
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone principale	Sortie des LSF	Sortie toit du Callovo-Oxfordien
SEN	5,8 %	0,4 %	< 10 ⁻² %	~ 10 ⁻³ %	61,1 %
SEA	5,8 %	0,4 %	<10 ⁻² %	~10 ⁻³ %	61,4 %

▪ **Transfert dans le Callovo-Oxfordien**

Du fait d'un terme source labile et de la mobilisation de tout l'inventaire en HA par la défaillance de l'ensemble des conteneurs de stockage:

- pour l'iode 129 et le chlore 36, les maxima de débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien et les dates d'occurrence de ces maxima sont globalement identiques à ceux du SEN et du SEA (Figure 5.2-3). Le relâchement en sortie du Callovo-Oxfordien est plus précoce d'environ 1000 ans ;
- pour le sélénium 79, du fait de son relâchement imposé par sa solubilité dans les argilites, le maximum de débit molaire est identique pour tous les scénarios étudiés.

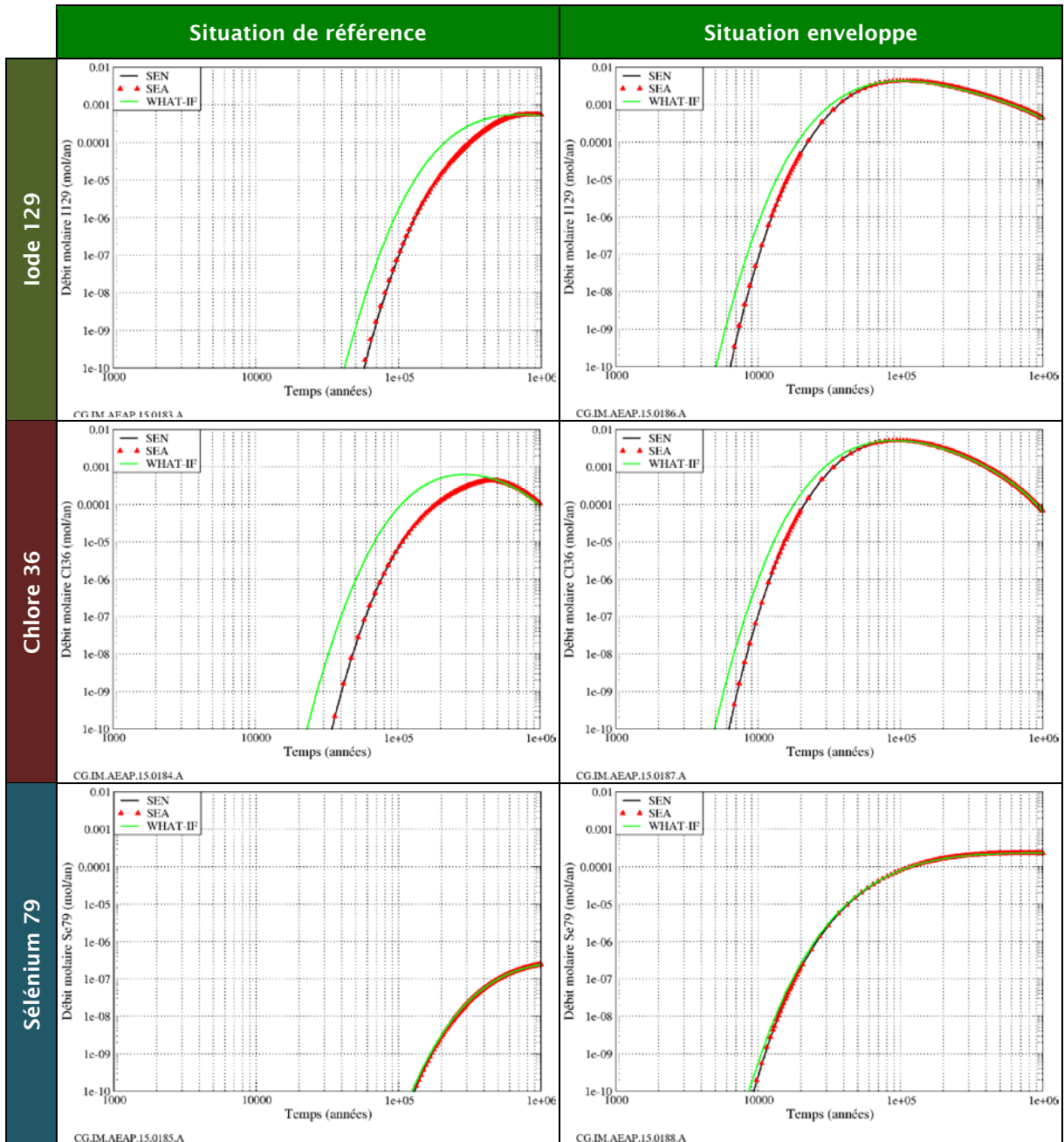


Figure 5.2-3 : Scénario défaut de conteneur HA - situation enveloppe, quartiers HA, bilan de la quantité d'iode 129, de chlore 36, de sélénium 79 : (en pourcentage par rapport à l'inventaire total en HA)

5.2.5 Enseignements

L'analyse globale des résultats présentés ci-avant conduit à dégager divers enseignements, en termes d'influence de la défaillance des conteneurs de stockage HA0 (SEA) et de tous les conteneurs de stockage HA (scénario « *What-if* ») sur le terme source et sur le transfert des radionucléides au sein des quartiers HA jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien :

- en raison du faible inventaire en radionucléides mobiles dans le quartier HA0, l'effet de la défaillance des seuls conteneurs de déchets HA0 n'a aucune influence sur les transferts par la voie ouvrages et par la voie du Callovo-Oxfordien ;
- les conditions de transfert au sein du stockage et dans le Callovo-Oxfordien ne sont pas affectées par la température et restent en diffusion dominante. Les résultats sont identiques au SEN du point de vue hydraulique ;
- la prise en compte de l'influence de la thermique et des conditions cimentaires dues au matériau de remplissage à l'extrados du chemisage et l'application d'un modèle « V0.S » conduisent à des relâchements instantanés (ou « labiles ») ;
- les dates d'occurrence des débits molaires sont avancées de 10 000 à 20 000 ans en raison du relâchement plus rapide des radionucléides. La faible solubilité du sélénium 79 limite cet effet pour ce radionucléide ;
- à l'échelle des alvéoles HA, la voie de transfert principale est le Callovo-Oxfordien. En effet, sur un million d'années, seulement 5 % de l'inventaire initial en iode 129 entre dans les galeries d'accès (et les argilites endommagées mécaniquement à leur pourtour). Cette prépondérance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries et par la longueur hectométrique des alvéoles HA ;
- les débits molaires des radionucléides mobiles entrant dans les galeries sont augmentés par rapport au SEN, en raison de l'effet de la température et du relâchement labile. Cependant, les temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien et par les ouvrages sont suffisamment longs pour masquer cet effet. Aucun effet significatif au toit du Callovo-Oxfordien n'est observé ;
- le transfert lent et limité par diffusion dans les galeries permet aux radionucléides qui migrent potentiellement par les ouvrages de diffuser vers le Callovo-Oxfordien. Ainsi, on observe une atténuation des débits molaires de ces radionucléides de 2 ordres de grandeur en entrée de la zone principale et une atténuation supplémentaire d'un ordre de grandeur le long des LSF ;
- le débit molaire d'iode 129 en sortie des ouvrages de liaison surface-fond reste inférieur de plusieurs ordres de grandeur au débit molaire de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien. A 1 million d'années, la quantité cumulée d'iode 129 qui est sortie des ouvrages de liaison surface-fond représente environ 0,00001 % (situation de référence) et 0,0001% (situation enveloppe) de l'inventaire total initial, soit environ 5 ordres de grandeur de moins que pour la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien ;
- les principales contributions au débit molaire sortant des ouvrages de liaison surface-fond sont les alvéoles HA situés en bordure de quartier HA0 et des quartiers HA1/HA2 les plus près de la zone principale.

VOLUME IV - ENSEIGNEMENTS - COMPOSANTS IMPORTANTES - ACTIVITES MISES EN PLACE DES LA CONCEPTION

1

Enseignements au stade de l'APS et Prochaines itérations de sûreté

<i>1.1</i>	<i>Les composants importants pour la robustesse du système de stockage après fermeture au stade de l'APS</i>	<i>388</i>
<i>1.2</i>	<i>La robustesse du système de stockage après fermeture est un élément important pour l'adaptabilité du projet Cigéo</i>	<i>393</i>
<i>1.3</i>	<i>Les enjeux de la prochaine itération de sûreté après fermeture pendant l'APD et support à la DAC</i>	<i>393</i>
<i>1.4</i>	<i>L'intégration progressive des évolutions de conception et des pistes d'optimisation dans le développement du projet Cigéo</i>	<i>394</i>

1.1 Les composants importants pour la robustesse du système de stockage après fermeture au stade de l'APS

De par ses caractéristiques géométriques et physico-chimiques intrinsèques (profondeur au-delà de 300 m, épaisseur supérieure à 130 m, faible perméabilité, capacité de rétention élevée, faibles coefficients de diffusion...), la formation du Callovo-Oxfordien dans laquelle est implantée Cigéo est le composant central pour assurer la sûreté passive après fermeture et à très long terme.

A cela s'ajoutent les caractéristiques géologiques favorables du site d'implantation de Cigéo : sa localisation dans une zone géologique d'activité sismique très faible et dont l'évolution géodynamique interne est limitée sur le million d'années, l'absence de discontinuités majeures, des faibles gradients hydrauliques verticaux dans le Callovo-Oxfordien, l'absence de ressources exceptionnelles...

Les dispositions de conception retenues, notamment en matière d'architecture générale de Cigéo, tirent parti des performances favorables du Callovo-Oxfordien :

- une architecture borgne qui limite les écoulements dans le stockage en mobilisant préférentiellement les faibles écoulements dans le Callovo-Oxfordien ;
- une longueur importante des alvéoles qui favorise la voie de transfert privilégiée par le Callovo-Oxfordien ;
- un stockage plan qui favorise des épaisseurs de gardes importantes du Callovo-Oxfordien...

Les dispositions de conception retenues préservent aussi les performances favorables du Callovo-Oxfordien :

- une limitation de la température maximale dans le Callovo-Oxfordien à 100 °C (marge prise à 90°C) ;
- une réduction des vides dans le stockage pour limiter l'extension de la zone endommagée sur le long terme et préserver ainsi des gardes importantes de Callovo-Oxfordien sain particulièrement au niveau des alvéoles de stockage ...

Les composants ouvragés jouent un rôle direct plus limité en regard de celui du Callovo-Oxfordien. Ils contribuent néanmoins à la robustesse du système de stockage en limitant le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques et/ou leur migration hors des alvéoles, en particulier suivant la voie de transfert par les ouvrages, notamment pour des situations de court-circuit du Callovo-Oxfordien ; Il s'agit plus particulièrement du conteneur de stockage HA et la matrice vitreuse HA de par la forte activité des déchets HA et des scellements des liaisons surface-fond de par leur position en sortie du stockage.

Bien que les performances des composants importants du système de stockage soient nécessaires après la fermeture définitive de Cigéo¹²⁹, la mise en place des exigences spécifiées puis des activités de contrôle et de surveillance des paramètres clés de ces composants intervient dès le choix du site (au travers de critères de choix de site), en conception (au travers d'exigences définies et d'études de R&D), pendant les phases de construction et d'exploitation et le cas échéant au-delà de la fermeture pendant la phase de surveillance¹³⁰ après fermeture. Ces activités sont présentées à ce stade au chapitre 2 du présent volume de manière préliminaire et seront précisées à la DAC.

¹²⁹ La fermeture définitive de Cigéo consiste au remblaiement des dernières galeries de la zone de soutien logistique, au scellement et au remblaiement des puits et descenderies. Les installations de surface sont démantelées. La loi du 28 juin 2006 dispose que seule une loi peut autoriser la fermeture définitive de Cigéo. Dans le calendrier actuel, la fermeture définitive de Cigéo est prévue vers 2150.

¹³⁰ Les objectifs précis et la durée de la phase de surveillance après fermeture restent à définir.

1.1.1 Le Callovo-Oxfordien, le pilier de la sûreté après fermeture du système de stockage

En se fondant sur les connaissances acquises depuis plus d'une vingtaine d'années à différentes échelles de caractérisation, le Callovo-Oxfordien est le pilier de la sûreté après fermeture du système de stockage à plusieurs titres :

- ***Le Callovo-Oxfordien permet de placer les colis de déchets à l'abri des aléas naturels externes et des activités humaines banales en les éloignant de la surface.***

Les travaux de reconnaissance depuis la surface et dans le Laboratoire souterrain sur le milieu géologique d'implantation de Cigéo, en particulier le Callovo-Oxfordien ont permis de déterminer ses caractéristiques intrinsèques et de vérifier qu'elles sont favorables à un stockage géologique de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Cette vérification a été menée globalement à l'échelle de la zone de transposition, le Dossier 2005 ayant établi la faisabilité de principe du stockage dans cette zone et le dossier 2009 ayant précisé la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA). La formation du Callovo-Oxfordien dans laquelle est implantée l'installation souterraine de Cigéo répond ainsi aux critères techniques de site du guide de sûreté relatif au stockage en formation géologique profonde publié par l'ASN en 2008 (1).

La profondeur du Callovo-Oxfordien, et donc de l'installation souterraine de Cigéo qui est bien en deçà de 200 m, le caractère asismique du Bassin parisien et l'évolution géodynamique interne limitée et homogène au niveau du site d'implantation de Cigéo protègent le système de stockage des phénomènes d'érosion sur le million d'années, de l'effet d'un séisme, ou d'une intrusion humaine involontaire « banale ». Par ailleurs, le site d'implantation est éloigné des grands accidents géologiques qui peuvent être hydrauliquement actifs et aucune faille dans le Callovo-Oxfordien de rejet supérieur à 5 m n'a été détectée sur la zone de transposition.

- ***Les caractéristiques intrinsèques du Callovo-Oxfordien, comme sa perméabilité, son épaisseur, son gradient hydraulique vertical, permettent de confiner les radionucléides et toxiques chimiques contenus dans les colis de déchets.***

De par sa très faible perméabilité et les faibles gradients hydrauliques, le Callovo-Oxfordien limite les apports en eau pour la voie de circulation par les ouvrages de stockage, en évolution normale mais aussi en cas de dysfonctionnement de tout ou partie des scellements ou d'intrusion humaine involontaire.

Les faibles apports d'eau et les caractéristiques géométriques et physico-chimiques du Callovo-Oxfordien (épaisseur importante, chimie de l'eau réductrice, capacité de rétention élevée...) sont favorables à :

- la limitation de la dégradation des colis de déchets, en particulier la matrice vitreuse HA, donc à la limitation du relâchement des radionucléides et toxiques chimiques ;
- la faible solubilité de la plupart des radionucléides et toxiques chimiques relâchés par les déchets ;
- un transfert privilégié des radionucléides et des toxiques chimiques relâchés par les colis de déchets par le Callovo-Oxfordien et à un transfert lent par diffusion.

Ainsi, l'essentiel des radionucléides et des toxiques chimiques restent confinés dans le stockage et en champ proche ; seuls les radionucléides à vie longue non sorbés et solubles, comme le chlore 36, migrent au travers du Callovo-Oxfordien, mais de manière retardée et atténuée.

A titre illustratif, sur 144 radionucléides contenus dans les colis de déchets, en scénario d'évolution normale, seuls l'iode 129 et le chlore 36, et dans une moindre mesure le sélénium 79, parviennent à sortir du Callovo-Oxfordien à des niveaux très faibles et à des dates d'occurrence des maxima de flux très tardives (bien au-delà de 300 000 ans). L'impact résiduel en termes de dose annuelle sur la base d'hypothèses enveloppes est ainsi très inférieur à la contrainte de dose de 0,25 mSv/an, valeur fixée par le guide ASN de 2008.

1.1.2 Les dispositions d'architecture et des composants ouvrages jouant un rôle complémentaire

Si le Callovo-Oxfordien joue un rôle central dans la sûreté après fermeture, les dispositions de conception et des composants ouvrages jouent des rôles complémentaires, suivant trois axes :

- tirer parti des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien,
- préserver ces caractéristiques favorables,
- ne mobiliser ces caractéristiques favorables après le relâchement de radionucléides et toxiques chimiques que dans des conditions physico-chimiques maîtrisées ou de manière lente dans le temps (cas des colis de déchets HA).

1.1.2.1 Des dispositions d'architecture générale tirant parti des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien

Ces dispositions visent *in fine* à favoriser la durabilité des colis de déchets et à privilégier la voie de transfert des radionucléides et toxiques chimiques potentiellement relâchés par les colis de stockage par le Callovo-Oxfordien.

Le caractère borgne de l'architecture, de manière globale et au niveau des quartiers de déchets

Cette disposition limite les flux d'eau dans le stockage en mobilisant les faibles flux d'eau dans le Callovo-Oxfordien, notamment en cas de défaillance de tous les ouvrages de fermeture (scénario « What-if »).

Cela conduit à (i) favoriser une dégradation faible et lente des colis de déchets, (ii) limiter le transfert de radionucléides et toxiques chimiques relâchés via les ouvrages de stockage jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien par les ouvrages de liaison surface-fond, et (iii) privilégier pour les radionucléides et toxiques chimiques la voie de transfert (lente) par le Callovo-Oxfordien.

Ainsi, en cas de défaillance de tous les scellements, les radionucléides susceptibles d'atteindre le toit et le mur du Callovo-Oxfordien sont en nombre limité (iode 129, chlore 36, sélénium 79, aluminium 26, potassium 40, calcium 41 et carbone 14 organique) et à des flux maxima faibles de sorte que leurs impacts résiduels en termes de dose sont similaires à ceux en scénario d'évolution normale (cas enveloppe).

La structure générale horizontale du stockage et les dimensions des ouvrages de stockage aussi limitées que nécessaire et raisonnable

Cela concerne en particulier les alvéoles HA de diamètre environ 0,7 m) du fait de leur haute activité.

Ces dispositions préservent des épaisseurs de Callovo-Oxfordien importantes entre le stockage et les formations encaissantes (Oxfordien calcaire et Dogger), favorables au retard et à la limitation du transfert des radionucléides et toxiques chimiques.

Le regroupement des puits et de la base des descenderies dans une même zone d'emprise restreinte

Cette disposition permet de limiter les « moteurs hydrauliques » entre les ouvrages de liaison surface-fond depuis l'Oxfordien calcaire, qui seraient de nature à augmenter les circulations d'eau au sein du stockage¹³¹.

Les (très) faibles gradients hydrauliques verticaux dans le Callovo-Oxfordien sur la ZIRA où sont implantés les puits contribuent à limiter les éventuelles circulations d'eau au sein du stockage entre ces ouvrages.

Dans ce contexte général, la localisation des quartiers HA1/HA2 globalement en aval hydraulique des puits et de la base des descenderies par rapport au sens des écoulements dans l'Oxfordien calcaire contribuent aussi à limiter les écoulements d'eau et donc la migration de radionucléides et toxiques chimie, depuis ces quartiers vers les puits et les descenderies.

¹³¹ Circulation préférentielle entre les ouvrages de liaison surface-fond.

Les longueurs significatives des alvéoles de stockage (pluri décamétrique pour les alvéoles HA et de plusieurs centaines de mètres pour les alvéoles MA-VL)

Cette disposition favorise le transfert privilégié des radionucléides et toxiques chimiques depuis les alvéoles de stockage vers le Callovo-Oxfordien.

Pour les radionucléides et toxiques chimiques qui sortiraient néanmoins des alvéoles de stockage vers les galeries, plus particulièrement en cas de scénario de dysfonctionnement des scellements, les longueurs des quartiers de stockage et des galeries favorisent aussi ce transfert privilégié vers le Callovo-Oxfordien et contribuent ainsi à limiter les flux de radionucléides et toxiques chimiques qui arriveraient au niveau des ouvrages de liaison surface-fond par les ouvrages du stockage.

1.1.2.2 Des dispositions d'architecture et des exigences préservant les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien

D'autres dispositions relatives à la préservation des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien sont retenues en complément de celles citées plus avant :

- l'orientation des alvéoles de stockage et des galeries de liaison et des quartiers de stockage devant recevoir des scellements selon la contrainte horizontale majeure. Cette disposition limite l'extension verticale de l'endommagement des argilites à leur pourtour et préserve ainsi au maximum des épaisseurs de Callovo-Oxfordien sain de part et d'autre ;
- la limitation des températures dans le Callovo-Oxfordien pour les déchets exothermiques, les dispositions d'architecture et les exigences visent à préserver les performances des composants ouvrages, notamment celles des colis de déchets ;
- la disposition des colis de déchets HA et des colis de déchets MA-VL dans des quartiers distincts éloignés de plusieurs centaines de mètres, la distance de plusieurs dizaines de mètres entre les alvéoles MA-VL et la séparation de familles de colis de déchets MA-VL potentiellement en interaction dans des alvéoles distincts. Cet ensemble de dispositions permet de limiter les interactions physico-chimiques (thermique, hydraulique, mécanique, chimique) entre les colis de déchets de différente nature, et donc favorise la préservation de leur performances. Cela se traduit par exemple par des valeurs des entraxes entre alvéoles MA-VL et par l'identification de familles de colis de déchets MA-VL co-stockables ou non ;
- la limitation des températures dans le Callovo-Oxfordien. Les températures maximales transitoires dans le Callovo-Oxfordien, liées aux déchets exothermiques, principalement les déchets HA, sont définies (100°C) afin de limiter toute transformation minéralogique qui aurait un effet sur les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien. Par ailleurs, on vérifie a posteriori que la réponse thermo-hydrromécanique du Callovo-Oxfordien ne perturbe pas les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien.

1.1.2.3 Des scellements des liaisons surface-fond s'opposant à la circulation d'eau¹³² par les ouvrages souterrains

De par leur position spécifique en sortie du stockage, les scellements des ouvrages de liaison surface-fond jouent avec le Callovo-Oxfordien le rôle le plus important dans la sûreté après fermeture sur le long terme. Ce rôle est conforme au guide de sûreté de l'ASN publié en 2008 (1) qui indique : « Les liaisons jour-fond et éventuellement certaines galeries et certains ouvrages de l'installation de stockage devront faire l'objet de scellements assurant une étanchéité de qualité spécifiée. Cette préoccupation doit être intégrée dès leur conception ».

Ces scellements tirent parti de l'absence de zone endommagée connectée dans l'unité litho-stratigraphique silto-carbonatée au toit du Callovo-Oxfordien pouvant constituer une zone de perméabilité élevée : la mise en place d'un noyau à base d'argile gonflante de (très) faible perméabilité dans cette unité au contact direct des argilites avec le retrait des revêtements-soutènements permet

¹³² De par leur position en sortie du stockage, les scellements des liaisons surface-fond assurent le rôle le plus important parmi l'ensemble des scellements, en contribuant à limiter les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes. Les scellements dans les galeries augmentent leur résistance hydraulique et contribuent à de faibles vitesses d'écoulement d'eau dans l'installation. Les scellements d'alvéoles de colis de déchets MA-VL participent au confinement au plus près des déchets.

ainsi de concevoir des scellements dont la perméabilité globale à saturation est faible (à ce stade de l'ordre de 10^{-11} m/s).

1.1.2.4 Des colis de stockage HA empêchant puis limitant le relâchement des radionucléides

L'Andra conçoit au mieux (en tenant compte des incertitudes scientifiques, des limites technologiques et des facteurs économiques) un conteneur de stockage HA pour lui conférer la plus grande durabilité possible d'étanchéité de manière à ne mobiliser les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien qu'après que l'activité radiologique contenue dans les déchets ait suffisamment décru. Cela correspond par ailleurs au retour à une température suffisamment basse vis-à-vis de la maîtrise du comportement des radionucléides et toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien, et de la faible dissolution de la matrice verre du fait de la présence d'eau.

Cette conception s'effectue de manière conjointe avec celle de l'alvéole, qui impose au conteneur ses conditions d'environnement. L'Andra retient à ce stade de vérifier que l'étanchéité à l'eau du conteneur de stockage HA sera maintenue a minima tant que la température à cœur du verre est supérieure à 50 °C pour les déchets HA0 (moyennement exothermiques) livrés avant 2075 et à 70 °C pour les déchets HA1/HA2 (fortement exothermiques) livrés au-delà de 2075. Avec l'architecture retenue pour l'installation souterraine, ces limites correspondent à une durée de moins de 500 ans après la fermeture de Cigéo.

Une fois le conteneur de stockage corrodé et ayant perdu son étanchéité, de par sa lente dissolution, le verre confine efficacement les produits de fission, d'activation et les actinides mineurs qui y sont incorporés.

1.1.3 Des composants ouvragés intervenant de façon plus limitée vis-à-vis des fonctions du système de stockage

- Les scellements de fond (scellements horizontaux)

En cas de perte de la fonction hydraulique des scellements verticaux ou inclinés, les scellements horizontaux limitent les flux d'eau et les flux de radionucléides transportés en solution le long des galeries jusqu'à la base des liaisons surface-fond.

Toutefois, ce sont des situations de dysfonctionnement important qui permettent de caractériser et de quantifier plus précisément le rôle de ces scellements. Ainsi, tant pour les scénarios SEA que pour les scénarios « *What-if* », cette limitation des flux d'eau, et de ce fait la limitation des flux de radionucléides (mobiles) sortant par la voie de transfert " stockage " s'observe plus particulièrement en situation enveloppe. Dans cette situation enveloppe, la performance hydraulique du Callovo-Oxfordien est choisie inférieure d'un facteur 25 à celle de la situation de référence, ce qui mobilise plus de flux d'eau au sein du stockage. Par ailleurs, pour ces configurations et par rapport au scénario de défaillance de tous les scellements, le rôle apporté par les scellements de fond est (a) de réduire jusqu'à un ordre de grandeur les débits maxima de radionucléides sortant par la voie de transfert " stockage " et (b) de favoriser la dominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

Par ailleurs, le scénario d'intrusion (forage) dans un alvéole MA-VL montre le rôle très limité des scellements d'alvéole MA-VL : le maximum de flux de radionucléides collecté par le forage est au plus augmenté d'un facteur 3 entre des scellements d'alvéole de haute performance hydraulique (faible perméabilité) et des scellements de performance hydraulique moindre (perméabilité augmentée de plus de 2 ordres de grandeur).

- Les remblais

Les remblais comme le remplissage des têtes d'alvéoles de stockage de colis HA contribuent à préserver localement les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien en réduisant les vides compressibles susceptibles d'être repris lors de la rupture des têtes d'alvéoles et des soutènements des galeries. Ils limitent ainsi un sur-endommagement des argilites. A ce stade, ils sont constitués par des argilites excavées, entreposées en verses en attente de leur réutilisation, et éventuellement complétées par des additifs.

- Les bétons d'alvéole MA-VL

Les bétons présents dans l'alvéole de stockage des colis de déchets MA-VL contribuent à maintenir un domaine de pH au sein de l'alvéole favorable à la durabilité de certains déchets MA-VL (boues bitumées, déchets métalliques) et à une faible solubilité (donc une faible mobilité en solution) de l'essentiel des radioactifs et toxiques chimiques en particulier les actinides, le béton constitutif des conteneurs de stockage MA-VL apportant une quantité de béton complémentaire.

En annexe 3 du Volume IV est présenté un tableau synthétisant les fonctions de sûreté après fermeture et leur correspondance avec les principaux composants du système de stockage et les caractéristiques associées.

1.2 La robustesse du système de stockage après fermeture est un élément important pour l'adaptabilité du projet Cigéo

Le système de stockage est adaptable à une évolution de l'inventaire radiologique et des chroniques de livraison. Au stade de l'avant-projet, l'évaluation de sûreté prend en compte les incertitudes de connaissance sur l'inventaire radiologique des colis de déchets et propose ainsi un inventaire « margé ».

Par ailleurs, l'Andra a réalisé des évaluations de sûreté non dépendantes des chroniques de livraison pour le quartier MA-VL et développé ainsi une méthode de redistribution des familles de colis de déchets par activité linéique décroissante à partir des accès du quartier (dans le respect des règles de co-stockage physico-chimique et géométrique). Ce mode de localisation de l'inventaire permet ainsi de rendre indépendant l'évaluation de sûreté après fermeture des évolutions de chroniques de livraison des colis par les producteurs sur la durée de l'exploitation.

Enfin, l'organisation de l'architecture de Cigéo préserve des volumes libres en souterrain, pour l'ajout d'alvéoles dans les alvéoles MA-VL, notamment pour le stockage des réserves FA-VL du PIGD, ou de quartiers, au sein de la ZIRA¹³³. L'application à ces alvéoles (et d'éventuels nouveaux quartiers) des grands principes et des exigences de conception décrits plus avant assureront l'absence d'impact sur la sûreté après fermeture pour les scénarios retenus.

1.3 Les enjeux de la prochaine itération de sûreté après fermeture pendant l'APD et support à la DAC

Les propriétés de la formation du Callovo-Oxfordien sont bien connues grâce à un important programme de caractérisation en forage et dans le Laboratoire souterrain.

La prochaine itération visera à conforter les enseignements de l'analyse de sûreté et plus particulièrement à hiérarchiser les paramètres clés et préciser le dimensionnement de certains composants ouverts.

Elle intégrera le dimensionnement des composants au stade de l'APD, ainsi que les études de R&D complémentaires présentées dans le plan de déroulement des études et essais de Cigéo (PDD) (28), programmés sur la période 2015-2017 et complétant les éléments déjà acquis. C'est le cas notamment des études sur les conteneurs de stockage HA, le comportement des alvéoles HA et MA-VL, les scellements fond, le transitoire hydraulique-gaz et les simulations associées. Les résultats seront intégrés dans les analyses qualitative puis quantitative de sûreté et seront présentés dans le rapport de sûreté en support de la demande d'autorisation.

L'itération de sûreté vérifiera ainsi les marges prises dans le cadre du DOS. Au vu des enseignements tirés des évaluations de sûreté menées pour le DOS, une attention particulière sera portée à la bonne

¹³³ Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie. Cette zone est compatible avec une implantation potentielle de l'accès de la descenderie dans la zone limitrophe Meuse/Haute-Marne ; sa superficie est d'environ 30 km². Cette zone ne préjuge pas de la possibilité de réaliser des parties du stockage en dehors, comme démontré dans le Dossier 2005 qui a établi la faisabilité de principe du stockage profond dans le Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition (qui englobe la ZIRA).

définition des niveaux de performance hydraulique nécessaires des ouvrages de fermeture au fond, notamment ceux des alvéoles MA-VL, en lien par ailleurs avec les études de conception.

L'analyse phénoménologique des situations de stockage pendant l'exploitation¹³⁴ et après fermeture définitive qui intégrera notamment la description détaillée de l'installation (phase APD) permettra de consolider les résultats de l'APS. Cette analyse phénoménologique prendra en compte notamment l'ensemble des composants ouvragés potentiellement laissés en place lors de la fermeture définitive de Cigéo afin de vérifier la faible perturbation apportée par ces composants sur le Callovo-Oxfordien.

1.4 L'intégration progressive des évolutions de conception et des pistes d'optimisation dans le développement du projet Cigéo

En raison de la progressivité du déploiement de l'installation industrielle Cigéo, et de l'augmentation continue des connaissances, le développement du projet dépassera le cadre de l'avant-projet définitif et se poursuivra sur plusieurs décennies ; ceci implique de considérer en permanence, par rapport à une configuration d'avant-projet sommaire, un portefeuille d'opportunités d'optimisation et de variantes techniques.

A chaque étape du développement du projet, l'état d'avancement des études sur ces différentes optimisations et l'analyse de leurs impacts croisés en matière de sûreté, d'enjeux techniques de réalisation et de coût permettent de définir lesquelles de ces variantes peuvent être intégrées dans une configuration proposée en réalisation et lesquelles doivent continuer à être étudiées en parallèle et avec quel calendrier d'aboutissement.

A l'échéance de la DAC, l'ensemble constitué par (i) la solution robuste et démontrée pour la première phase de travaux de réalisation (T1) comme pour les phases ultérieures de travaux (TU) proposées à ce moment, et telle que proposée en réalisation pour la T1, (ii) les évolutions de conception envisagées pour les différentes TU en regard de leurs échéances de réalisation, et (iii) la méthode et le calendrier envisagé pour leur démonstration et leur intégration progressive dans la réalisation, sera présenté comme la référence du projet. Cette démarche inclura la nécessité de mettre en œuvre au cours du temps les meilleures techniques disponibles dans une logique d'amélioration continue de la sûreté et d'optimisation technico-économique.

Au stade de la fin d'avant-projet sommaire, les principales variantes identifiées ayant un impact potentiel sur la sûreté après fermeture sont les suivantes :

¹³⁴ Conditions de fermeture des alvéoles pendant l'exploitation notamment.

Tableau 1.4-1 : Au stade de la fin d'avant-projet sommaire, principales opportunités d'optimisation et variantes techniques identifiées ayant un impact potentiel sur la sûreté après fermeture sont les suivantes

Opportunités d'optimisation et variantes techniques	Intérêt d'un point de vue technique ou technico-économique	Vérification de sûreté après fermeture envisagée d'ici la DAC ou au-delà
Stockage direct des colis de déchets MA-VL	<p>Diminution du nombre d'alvéoles MA-VL, donc du linéaire de galerie du quartier MA-VL</p> <p>NB : Facilité éventuelle des opérations de construction, d'exploitation et de fermeture du quartier MA-VL</p>	Impact des scénarios d'intrusion humaine involontaire dans l'alvéole de stockage et en scénario de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture.
Ouvrages de fermeture dans le quartier MA-VL (matériau de remplissage)	<p>Optimiser le nombre de scellements (<i>performances, position, et nombre</i>)</p> <p>NB : accroissement éventuel de la facilité des opérations d'exploitation du quartier MA-VL, lors de la réalisation des scellements</p>	<p>Impact en SEA intrusion</p> <p>Impact pour tous les scénarios de sûreté retenus, notamment le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond</p> <p>NB : les scellements des liaisons surface fond sont avec le Callovo-Oxfordien les éléments importants pour la sûreté à long terme. Le système de fermeture qui sera mis en place dans les galeries et alvéoles MA-VL, associant remblais et scellements, et dont la définition sera précisée en cours d'APD, apportera des marges complémentaires.</p>
Alvéoles MA-VL de plus grande section	Diminutions corrélées du nombre d'alvéoles et du linéaire de galeries du quartier MA-VL, par accroissement du nombre de colis par alvéole.	Au-delà de la T1, impact de la densification de l'activité dans l'alvéole MA-VL et de la densification du quartier MA-VL, pour tous les scénarios de sûreté retenus.
Soutènement des galeries et des alvéoles MA-VL : utilisation de voussoirs compressibles	<p>Diminutions corrélées de la section excavée et de l'épaisseur de béton</p> <p>Technique de pose mécanisée améliorant éventuellement la sécurité du chantier</p> <p>NB : accroissement de la maîtrise de la stabilité des ouvrages sur la période d'exploitation de Cigéo</p>	<p>Impact potentiel sur la zone endommagée lors du creusement et son évolution dans le temps</p> <p>Impact potentiel de la limitation de quantité de béton dans les alvéoles MA-VL sur les performances de confinement des colis de déchets MA-VL et le confinement des radionucléides et toxiques chimiques relâchés au sein des alvéoles</p> <p>Si nécessaire, impact potentiel pour tous les scénarios de sûreté retenus</p>

Opportunités d'optimisation et variantes techniques	Intérêt d'un point de vue technique ou technico-économique	Vérification de sûreté après fermeture envisagée d'ici la DAC ou au-delà
Dimensionnement moins pénalisant de tous les soutènements-revêtements, sur base d'une loi de comportement précisée	Diminution corrélée de la section excavée et de l'épaisseur de béton	Impact potentiel sur la zone endommagée lors du creusement et son évolution dans le temps. Impact potentiel de la limitation de quantité de béton dans les alvéoles MA-VL sur les performances de confinement des déchets MA-VL et le confinement des radionucléides et toxiques chimiques relâchés au sein des alvéoles. Si nécessaire, impact potentiel pour tous les scénarios de sûreté retenus.
Alvéole HA1/HA2 de plus grande longueur (150m)	Réduction du nombre d'alvéoles HA1/HA2 et du linéaire de galeries des quartiers HA1/HA2 NB : accroissement de la facilité des opérations de construction, d'exploitation et de fermeture des quartiers HA1/HA2	Impact de la densification des quartiers HA1/HA2, pour tous les scénarios de sûreté retenus NB : une plus grande longueur d'alvéole contribue plus encore à favoriser le transfert des radionucléides relâchés par les colis HA vers le Callovo-Oxfordien, et corrélativement à limiter leur transfert vers les galeries.
Dimensionnement thermique des quartiers HA1/HA2, basé sur une évolution du critère de rupture des argilites sous chargement thermo-hydrromécanique (critère moins pénalisant)	Diminution du linéaire de galeries des quartiers HA1/HA2, notamment par réduction éventuelle des entraxes entre alvéoles NB : cf. lien avec l'augmentation de la longueur des alvéoles HA	Impact potentiel pour tous les scénarios de sûreté retenus, du fait de la densification des quartiers HA1/HA2 NB : par conception, respect des critères thermiques ($T < 90^{\circ}\text{C}$) et THM (critère inchangé)
Mise en place des colis MAVL vitrifiés en intercalaire des colis HA1/HA2	Diminution du nombre d'alvéoles MA-VL, donc du linéaire de galeries du quartier MA-VL	Au-delà de la T1, impact pour tous les scénarios de sûreté retenus : <ul style="list-style-type: none"> • HA : densification de l'activité dans les alvéoles HA1/HA2 et les quartiers HA1/HA2 concernés, • MA-VL : réduction du linéaire de galeries du quartier MA-VL

L'étude de ces variantes est incluse dans la logique de déroulement de l'avant-projet définitif, afin de préciser, à l'échéance de la DAC, lesquelles pourront être présentées dans la solution de réalisation en T1, et lesquelles devront faire l'objet d'études complémentaires en vue d'une intégration dans la TU.

2

Les activités importantes de la conception à la fermeture du stockage

2.1	<i>Activités de contrôles et de surveillance pendant la construction jusqu'au démarrage de la phase industrielle pilote</i>	398
2.2	<i>Activités pendant la phase industrielle pilote puis en exploitation courante</i>	399
2.3	<i>Contrôle et surveillance après la fermeture définitive</i>	404
2.4	<i>L'observation : un complément à la surveillance de l'installation</i>	404

La faisabilité de principe du stockage de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue dans la formation géologique du Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse/Haute Marne a été établie en 2005, tant sur le plan de la sûreté, particulièrement la sûreté après fermeture, que sur le plan de la réalisation, de l'exploitation et de la fermeture du stockage.

Les études scientifiques et technologiques se sont poursuivies depuis 2005 en vue du dépôt d'une demande d'autorisation de création de Cigéo et la faisabilité «industrielle» a été confirmée dans le cadre de la « revue critique de faisabilité » (2013) qui a permis à l'Andra d'engager la phase d'avant-projet.

Afin d'apprécier la maturité de la progression du développement des composants ouvragés de Cigéo, plus particulièrement ceux qui constituent des éléments importants pour la sûreté après fermeture (scelllements des ouvrages de liaisons surface-fond, conteneur HA, architecture générale...), l'Andra a retenu d'utiliser l'échelle internationale TRL (Technology Readiness Level) comme outil indicatif¹³⁵. Cette échelle présentée dans la figure en annexe 1, fait l'objet d'une norme ISO (16290-2013) qui a été transposée par l'Andra dans son PDD (28).

Afin de s'assurer de la protection et de la préservation des dispositifs de sûreté passive après fermeture, un niveau approprié de contrôle et de surveillance est appliqué à Cigéo dès la construction puis pendant son exploitation en tant que de besoin, de façon à s'assurer que les composants du système de sûreté rempliront leurs fonctions de sûreté après fermeture au moment de la fermeture définitive de Cigéo.

Au stade de l'avant-projet sommaire, sur la base des éléments présentés dans les volumes II et III, l'Andra a établi une liste préliminaire des composants de Cigéo et de leurs caractéristiques clés ; la liste sera confirmée dans le rapport de sûreté en support de la demande d'autorisation de création.

Par ailleurs, conformément au chapitre V de l'arrêté du 7 février 2012 (15), bien que la fermeture définitive de Cigéo intervienne dans une période relativement lointaine, des dispositions sont prises dès la conception, puis pendant l'exploitation, afin de garantir que les fonctions de sûreté après fermeture à assurer par les composants importants puissent être satisfaites et le cas échéant mener les actions correctives. Cela concerne notamment la mise en place d'études et de démonstrateurs suffisamment à l'avance, de contrôles et de surveillance dès la construction puis pendant l'exploitation des caractéristiques des éléments.

Les sections qui suivent présentent une première liste des activités mises en place ou à mettre en place. Le plan de contrôle et de surveillance fera l'objet notamment de précisions dans le cadre du rapport de sûreté en support de la demande d'autorisation.

2.1 Activités de contrôles et de surveillance pendant la construction jusqu'au démarrage de la phase industrielle pilote

La phase de construction initiale joue un rôle primordial dans le déroulement de référence de Cigéo. Les premiers éléments construits et à être mis en service pour la réception et le stockage de colis sont notamment les descenderies, les puits et les premières alvéoles MA-VL. De plus, les ouvrages construits serviront aux essais (démonstrateurs, exploitation et surveillance) nécessaires au bon démarrage de Cigéo et à la montée en régime de son exploitation dans le cadre de la phase industrielle pilote.

¹³⁵ Les conditions dans lesquelles les composants rempliront leurs fonctions est singulier. Les fonctions de certains éléments devront être maintenues après-fermeture et dans des conditions évolutives (absence d'eau, puis resaturation ; modification des conditions redox...) afin que l'objectif fondamental de sûreté passive du stockage après fermeture puisse être atteint. L'utilisation de l'échelle TRL pour l'évaluation du niveau de maturité technologique de Cigéo et des éléments qui le composent tient compte de cet environnement opérationnel particulier. Les essais auxquels les éléments seront soumis afin d'évaluer leurs performances intégreront ces spécificités. Des tests et des simulations permettant d'évaluer en particulier la robustesse et la durabilité des éléments dans les différentes successions de situations que rencontreront les colis seront être mis en œuvre.

La liste des paramètres à contrôler et à surveiller sera consolidée d'ici la demande d'autorisation de création. Les premiers éléments concernant la surveillance à mettre en place sont présentés comme suit à ce stade.

En lien avec les fonctions de sûreté après fermeture à assurer par la formation du Callovo-Oxfordien

- l'état (fracturation, oxydation, état de saturation...) des argilites en paroi de chaque liaison surface-fond au droit de l'unité USC du Callovo-Oxfordien, des alvéoles de stockage MA-VL et des portions de galeries destinées à être scellées ;
- la géométrie des alvéoles de stockage ;
- la position géométrique des alvéoles et des portions de galeries destinées à être scellées par rapport au toit et au mur du Callovo-Oxfordien ;
- les caractéristiques géométriques et physico-chimiques des revêtements et chemisages dans les zones de scellements, les alvéoles de stockage MA-VL et les galeries d'accès ;
- les caractéristiques géométriques et physico-chimiques des matériaux apportés et qui seront laissés en place une fois l'installation fermée.

En lien avec les fonctions de sûreté après fermeture à assurer par les scellements

- des ouvrages spécifiques sont choisis parmi les tronçons de descenderies et de puits destinés à recevoir des scellements verticaux et inclinés lors de la fermeture définitive du stockage ;
- des ouvrages spécifiques sont choisis parmi les galeries de liaisons destinés à recevoir des scellements horizontaux lors de la fermeture du quartier.

2.2 Activités pendant la phase industrielle pilote puis en exploitation courante

2.2.1 Le cadre général

Le développement incrémental du projet passe par la confirmation, dans l'environnement opérationnel réel, des hypothèses prises lors de la conception. La phase industrielle pilote¹³⁶ s'inscrit dans ce cadre et permet de conforter les prévisions d'évolution ultérieure du stockage. Elle comprend la mise en œuvre de démonstrateurs (ouvrages de fermeture, alvéoles d'essais...) qui s'attacheront à vérifier :

- les performances des composants ;
- la capacité à sceller les galeries et les descenderies ;
- la capacité à surveiller les ouvrages de stockage.

Les principes et les objectifs du programme d'essais mené dans Cigéo au cours de la phase industrielle pilote en lien avec la sûreté après fermeture sont synthétisés dans le PDE (8).

Un bilan de la phase industrielle pilote est envisagé à ce stade une dizaine d'année après son démarrage.

Ce bilan comprendra entre autres le bilan des premiers résultats des essais/démonstrateurs/surveillance en lien avec la sûreté après fermeture.

Les activités de surveillance se poursuivront pendant la période d'exploitation courante. Un bilan du REX de l'exploitation et de sa surveillance sera proposé à chaque réexamen de sûreté conformément à la réglementation. Pendant la phase industrielle pilote, puis en exploitation courante, le programme de surveillance portera notamment sur des paramètres liés au dimensionnement et au comportement des ouvrages pour une exploitation séculaire. A titre d'exemple, la vérification des caractéristiques importantes du Callovo-Oxfordien, plus particulièrement celles en champ proche du stockage, prises comme données d'entrée dans l'évaluation de sûreté après fermeture (perméabilité, comportement

¹³⁶ La phase industrielle pilote est une période temporelle du projet Cigéo et non un « objet » en tant que tel. Pendant cette période, l'objectif est de réaliser toutes les opérations d'essais, de mise en place de démonstrateurs (par exemple de scellement ou d'alvéoles), d'exploitation et de surveillance nécessaires au bon démarrage de Cigéo et à la montée en régime de l'exploitation.

mécanique...), sera intégrée au programme de surveillance mené au cours de la phase industrielle pilote.

Certains des ouvrages réalisés lors de la phase de construction initiale, comme les descenderies, les puits ou la zone de soutien logistique (parties « exploitation » et « travaux »), seront utilisés sur toute la durée de l'exploitation de Cigéo. A ce titre, ils sont dimensionnés pour faciliter le développement et la construction de toutes les tranches suivantes.

Au cours de toute la durée de l'exploitation de Cigéo, et notamment à l'occasion des réexamens de sûreté périodiques, il sera vérifié sur la base de l'acquisition continue des connaissances, en particulier liée au retour d'expérience de l'exploitation et de la surveillance de l'installation, que les étapes de fermeture du déroulement de référence sont compatibles avec les objectifs et le maintien des fonctions de sûreté après fermeture du stockage.

Certaines pistes d'optimisation feront l'objet d'études spécifiques pendant la phase industrielle pilote. A cet égard, comme indiqué dans le PDE (8), l'Andra a d'ores et déjà prévu d'étudier l'élargissement du diamètre des alvéoles MA-VL en construisant un démonstrateur d'alvéole de stockage inactif de grande dimension. Ce démonstrateur fera l'objet de mesures et d'essais : si les résultats sont satisfaisants et sous réserve d'autorisation, des alvéoles de stockage de cette dimension seront construites dans les tranches ultérieures pour certaines familles de colis. La mise en œuvre d'autres pistes d'optimisation relatives notamment à l'allongement des alvéoles HA1/HA2, dont la construction est actuellement prévue vers 2068¹³⁷, et au stockage direct des colis MA-VL¹³⁸ (essais de manutention et de mise en place) pourra également être étudiée dès la phase industrielle pilote via des démonstrateurs inactifs adaptés.

Le processus global de développement et d'intégration des pistes d'optimisation de Cigéo sera décrit de façon plus détaillée dans le cadre de la DAC.

2.2.2 Les démonstrateurs d'ouvrages de fermeture

Pour ce qui concerne les ouvrages de fermeture qui constituent un des éléments importants de la sûreté après fermeture de Cigéo, l'Andra prévoit la réalisation de démonstrateurs de scellements dans Cigéo et plus particulièrement dès la phase industrielle pilote. Les démonstrateurs envisagés à ce stade (cf. volume II du présent document) sont :

- un démonstrateur de scellement de descenderie ;
- un démonstrateur de scellement de référence de galerie ;
- un démonstrateur de scellement dit de « coupure hydraulique » retenu à ce stade en variante.

Il est prévu de réaliser ces ouvrages dans une zone dédiée située au bas des descenderies. La localisation de cette zone pourrait toutefois évoluer au cours des études de conception afin de limiter les contraintes liées aux opérations de construction et d'exploitation, et de bénéficier d'une plus grande emprise pour son développement potentiel (hors démonstrateur de scellement de descenderie qui serait localisé au toit du Callovo-Oxfordien en lien avec ses spécifications).

Ces « démonstrateurs » implantés dans Cigéo ne participent pas au fonctionnement du système de stockage. Leur rôle est de démontrer, à une échelle industrielle, la maturité et l'efficacité des solutions techniques proposées qui seront mises en œuvre lors des phases ultérieures de développement de l'installation souterraine : ils apportent des éléments de démonstration sur certains ouvrages permettant de passer les niveaux de maturité technologique nécessaires à l'obtention de l'autorisation de leur construction. Cette étape permet de préparer la réalisation de premiers scellements de galerie réels à l'horizon 2040, si le choix en est fait. Concernant les scellements de puits, la perspective à terme d'une fermeture du Laboratoire souterrain offre la possibilité d'y réaliser une démonstration de scellement d'un puits représentatif ayant été exploité et observé pendant plusieurs dizaines d'années, puis de suivre, sur la durée, l'évolution de l'ouvrage scellé.

¹³⁷ Selon le PDE actuel

¹³⁸ Stockage du colis MAVL livré par le producteur, sans introduction préalable dans un conteneur de stockage

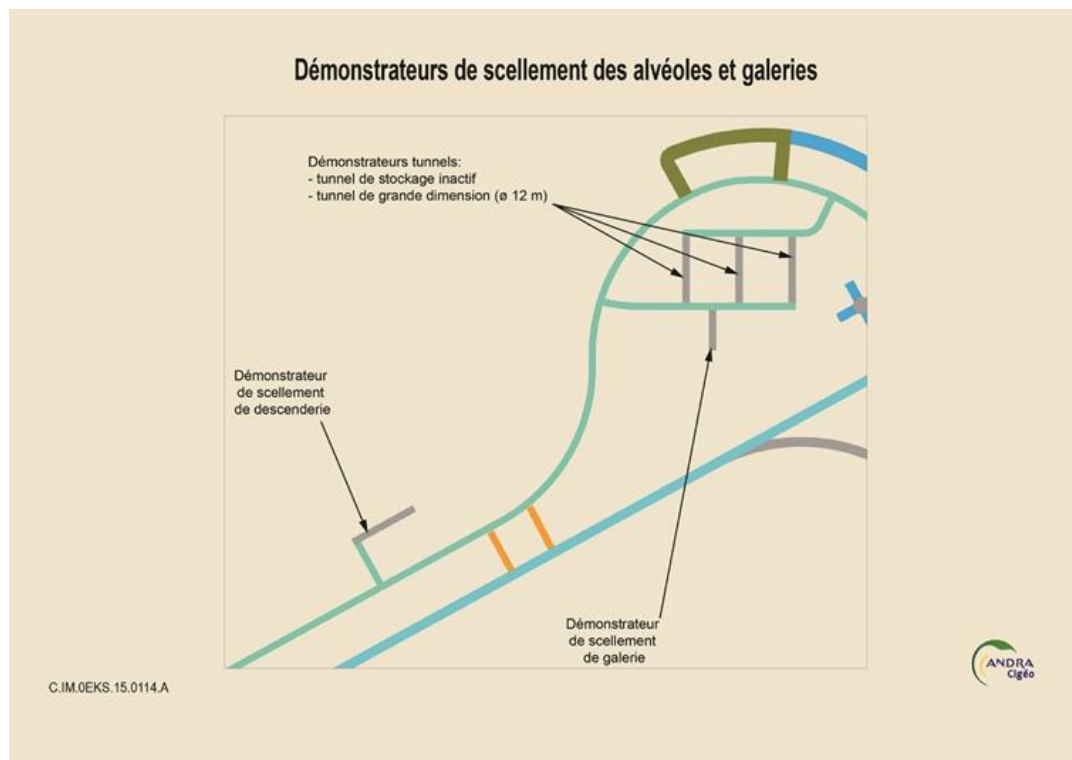


Figure 2.2-1 : Schéma de la zone d'implantation au stade APS des démonstrateurs d'alvéole HA et de coupure hydraulique non représentés (l'emplacement de la zone au sein de l'installation souterraine est susceptible d'évoluer au cours des études de conception)

Certaines parties de l'installation souterraine (des alvéoles HA et MA-VL, des tronçons de descendière et de puits, des tronçons de galerie ou des intersections), pourront faire l'objet de mesures de surveillance spécifiques. Leurs rôles et les fonctions des mesures spécifiques qu'ils abritent seront définis dans le dossier de DAC.

Pour ce qui concerne les scellements, il est aussi envisagé de réaliser des tronçons d'observation de galerie représentatifs des différents tronçons à sceller, mais non destinés *in fine* à recevoir un scellement. Implantés au niveau principal, ces tronçons d'observation seraient positionnés dans l'installation respectivement à proximité de l'entrée d'air et à proximité du retour d'air, pour couvrir l'ensemble du domaine de sollicitation thermique et hydrique des tronçons à sceller. Ils permettraient de suivre plus en détail l'évolution des argilites en champ proche (déformations, fracturation, désaturation...) sans se préoccuper de la compatibilité de l'instrumentation avec les exigences de réalisation ultérieure d'un scellement.

2.2.3 Les alvéoles témoins

Tous les alvéoles de stockage sont a priori équipés de dispositifs de surveillance. Certains alvéoles dits « alvéoles témoins » sont équipés de dispositifs de surveillance spécifiques donnant des informations complémentaires de celles fournies par les dispositifs de surveillance présents dans tous les alvéoles et valables pour un ensemble d'alvéoles similaires non équipés de ces dispositifs. Deux des premiers alvéoles MA-VL de la phase industrielle pilote seront des alvéoles témoins. En outre un alvéole MA-VL témoin dit « inactif », ne contenant que des colis fictifs et représentatif des premiers alvéoles remplis de colis, est prévu dès la phase industrielle pilote pour permettre plus particulièrement un suivi de l'évolution des contraintes sur le revêtement-soutènement, le comportement mécanique du revêtement-soutènement, le comportement mécanique des argilites en champ proche et leur endommagement éventuel tout au long de l'exploitation du quartier MA-VL.

En complément du contrôle de réalisation des ouvrages qui fournit un état initial, la surveillance mise en place dès la construction est maintenue au fur et à mesure de l'avancement de Cigéo par tranche.

En particulier l'alvéole MA-VL témoin inactif permettra d'assurer indirectement un suivi du maintien de la garde d'argilites saines pendant la phase d'exploitation. Le maintien de la garde est suivi également de manière indirecte dans les alvéoles MA-VL en vérifiant le respect du taux de vides initial dans la chambre de stockage ; cette vérification s'appuie sur le contrôle de réalisation de la géométrie initial de la chambre de stockage et le contrôle de la position des colis lors de leur mise en place. Elle utilise également le suivi de l'évolution des jeux au sein des alvéoles MA-VL témoins.

2.2.4 Le contrôle et la surveillance et de l'architecture

Le programme de surveillance portera notamment sur des paramètres clés du dimensionnement de l'architecture définis en APD.

Certaines parties de l'installation souterraine (des alvéoles HA et MA-VL, des tronçons de descendierie et de puits, des tronçons de galerie ou des intersections), choisies pour leur caractère représentatif d'un ensemble d'ouvrages ou pour leur positionnement particulier (par exemple à l'emplacement d'un futur scellement) feront l'objet de mesures de surveillance spécifiques. Leurs rôles et les fonctions des mesures spécifiques qu'ils abritent seront définis dans le dossier de DAC.

En outre, dans le cadre du développement incrémental du projet, l'Andra mènera un programme d'observation qui n'a pas de caractère réglementaire. Elle rentre dans l'amélioration continue des connaissances, en vue notamment d'optimiser Cigéo.

2.2.5 Le contrôle et la surveillance des colis

Les exigences de nature qualitative, quantitative ou déclarative sont regroupées dans les spécifications d'acceptation des colis mentionnées à l'article L.542-12 du Code de l'environnement.

Les exigences sont spécifiées pour les colis primaires de déchets et résultent de la prise en considération de la sûreté de Cigéo pendant son exploitation et après fermeture, ainsi que des contraintes opérationnelles, de sécurité, de santé et de protection de l'environnement. Elles font partie du référentiel d'exploitation de Cigéo.

L'Andra et les producteurs ont démarré une réflexion conjointe dès à présent pour d'une part préciser la stratégie de la maîtrise de la qualité des colis qui sera retenue en fin d'avant-projet détaillée et, d'autre part les dispositions techniques et organisationnelles qui seront à mettre en œuvre pour appliquer cette stratégie. Cette élaboration conjointe doit permettre de rendre objectives et partagées les règles qui seront ainsi définies.

Pour ce qui concerne les conteneurs de stockage HA, compte tenu de leur importance, des opérations de contrôles lors de la mise en conteneur des colis primaires HA, pendant la soudure de la tête sur le corps du conteneur et après sont mises en place dans l'installation pour garantir les exigences définies. Le procédé de fabrication retenu s'appuiera sur des procédures d'approvisionnement, de construction, de contrôles codifiés, normalisées. Des contrôles sont prévus en usine ainsi que sur Cigéo pour réduire le risque de défaut de fabrication et détecter un éventuel écart. Avant soudage, les contrôles suivants seront réalisés en usine sur chaque pièce pour s'assurer de sa conformité.

Les moyens de contrôle des différentes opérations de fabrication des colis HA sont aujourd'hui disponibles et éprouvés, comme un examen visuel, un contrôle dimensionnel, un contrôle par ultrasons ou un contrôle par courants de Foucault pour la détection d'éventuels défauts.

2.2.6 Le bilan prévisionnel

Le tableau ci-dessous regroupe les besoins de surveillance en phase d'exploitation qui sont spécifiques à la sûreté après fermeture en lien avec les fonctions de sûreté, tels qu'identifiés à ce stade.

Cette liste de paramètres pourra évoluer en fonction des études en cours menées pour la demande d'autorisation de création.

Tableau 2.2-1 Liste préliminaire des besoins prévisionnels de surveillance spécifiques à la sûreté après fermeture

Fonctions de sûreté après fermeture	Composant de l'installation souterraine ausculté	Besoins prévisionnels de surveillance dans le temps
S'opposer à la circulation d'eau	Tronçons des liaisons surface-fond dans les formations encaissantes destinés à accueillir un scellement	Champs de charge hydraulique dans les horizons poreux de l'Oxfordien carbonaté et dans le Barrois
	Tronçons des liaisons surface-fond dans le Callovo-Oxfordien destinés à accueillir un scellement	Caractéristiques des argilites en champ proche, notamment les argilites endommagées, (perméabilité, porosité, fracturation, extension spatiale, déformation, désaturation)
	Tronçons de galerie destinés à accueillir un scellement	Contraintes appliquées au revêtement-soutènement et des déformations du revêtement-soutènement
	Démonstrateurs de scellements de descendierie et de galerie	Caractéristiques des argilites en champ proche, notamment les argilites endommagées, (perméabilité, porosité, fracturation, extension spatiale, déformation, désaturation) avant, pendant et après dépose du revêtement Prise du béton, fracturation, contraintes et déformations des massifs de confinement mécanique en béton Resaturation du noyau et argileux (teneur en eau, pression interstitielle, contraintes, déformations) Contraintes et/ou déformations entre le noyau argileux, les argilites en champ proche et les massif de confinement mécanique en béton ; Contraintes et déformations dans le noyau argileux ; Écoulements d'eau (débit) dans le scellement et aux interfaces
Limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage	Alvéole de stockage MA-VL	Conditions d'ambiance de l'alvéole : température, hygrométrie et présence d'eau liquide éventuelle Déformations, déplacements et état physico-chimique des colis Déformations de l'alvéole
	Alvéole HA et colis de stockage HA	Conditions d'ambiance de l'alvéole : température, hygrométrie et présence d'eau liquide, présence d'O ₂ et présence d'H ₂ ; Composition chimique de l'eau liquide récupérée en tête d'alvéole Venue d'eau ou trace d'humidité au niveau de la galerie autour de l'alvéole HA, en particulier au niveau de l'interface entre l'alvéole et les argilites Déformations des chemisages et des colis Etat de corrosion des conteneurs, notamment la présence de zones de corrosion localisée
Retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques	Installation souterraine, Callovo-Oxfordien	Caractéristiques des argilites en champ proche, notamment les argilites endommagées, (perméabilité, porosité, fracturation, extension spatiale, déformation, désaturation) Présence de radionucléides et toxiques relatifs aux déchets dans l'Oxfordien carbonaté Champs de charges hydrauliques dans l'Oxfordien carbonaté (horizons poreux)
Préserver les propriétés	Galeries et alvéoles de stockage MA-VL	Caractéristiques des argilites en champ proche, notamment les argilites endommagées, (perméabilité, porosité, fracturation, extension spatiale,

Fonctions de sûreté après fermeture	Composant de l'installation souterraine ausculté	Besoins prévisionnels de surveillance dans le temps
favorables des argilites	Alvéoles de stockage HA	déformation, désaturation, oxydation, températures, pressions interstitielles et contraintes totales)
	Milieu géologique	Champs de charge hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté autour des ouvrages de liaison surface-fond et au droit du stockage Température dans l'Oxfordien carbonaté, plus particulièrement au droit des quartiers de déchets exothermiques Champs de pressions interstitielles dans le Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages de liaison surface-fond et des ouvrages de l'installation fond Champs de température dans le Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages des quartiers HA

2.3 Contrôle et surveillance après la fermeture définitive

Les éventuels dispositifs de surveillance après fermeture seront limités et ne devront pas perturber le stockage ni le Callovo-Oxfordien afin de garantir le maintien de la sûreté passive.

A ce stade, pour l'installation fond, l'Andra vise principalement l'utilisation de solutions techniques non intrusives depuis la surface (géophysique...). Eventuellement des mesures au sein même des ouvrages de stockage avec transmission des données sans fil à travers les terrains depuis le fond jusqu'à la surface pourront être utilisées. Le suivi des charges hydrauliques dans l'Oxfordien carbonaté pourra permettre de vérifier indirectement le bon fonctionnement des scellements des ouvrages de liaison surface-fond.

Des systèmes de surveillance après fermeture seront mis en œuvre dès la phase d'exploitation pour permettre d'effectuer des corrélations avec les données obtenues par les dispositifs d'auscultation en exploitation.

2.4 L'observation : un complément à la surveillance de l'installation

Dans le cadre du développement incrémental du projet, l'Andra mènera un programme d'observation qui n'a pas de caractère réglementaire. Il rentre dans l'amélioration continue des connaissances, en vue notamment d'optimiser Cigéo.

L'observation consiste en des investigations d'un fait, d'un processus, en vue de mieux le comprendre, notamment en identifiant son origine. Elle s'inscrit dans le cadre d'une démarche d'amélioration continue (démarche « exploitant responsable » conforme à l'art. 2.7.2 de l'arrêté INB du 7 février 2012).

L'observation in situ amènera des éléments de connaissance additionnels à ceux issus des études de conception et de R&D menées en amont et parallèlement à la réalisation du stockage. Elle vise à :

- alimenter la prise de décision au fur et à mesure du développement de l'installation souterraine et de sa fermeture par étape ;
- suivre les processus phénoménologiques afin de confirmer leurs premiers stades d'évolution et accroître la confiance dans les connaissances intervenant dans l'évaluation de sûreté à long terme ;
- mieux apprécier les marges prises dans les dimensionnements en vue de l'optimisation de la conception future de nouvelles tranches.

ANNEXES

ANNEXES DU VOLUME I

Annexe 1 : Gestion de la mémoire

Le guide de sûreté relatif au stockage en formation géologique profonde publié par l'Autorité de sûreté nucléaire (1) 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 ».

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.

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. Le principe retenu en matière de gestion de la mémoire repose sur deux exigences :

- la recherche de solutions techniques pour maintenir le plus longtemps possible de la mémoire avec un minima de 500 ans après la fermeture ;
- la prise en compte dans l'évaluation de sûreté de la possibilité d'une perte de la mémoire dès 500 ans conformément au guide de sûreté (1) et d'une intrusion humaine involontaire par voie de conséquences dès cette date.

Au travers de son retour d'expérience sur ses centres de surface, notamment le centre de stockage de la Manche (CSM), l'Andra a mis en place une solution mémorielle robuste sur au moins 6 siècles, dite « solution de référence ».

▪ **Présentation de la solution de référence**

La problématique de la mémoire des centres de stockage a été prise en compte dès les années 1980 pour le Centre de stockage de la Manche (CSM). Pour y répondre, une solution d'archivage sur papier permanent a été définie en 1995. En 1996, la commission Turpin a conforté les modalités retenues par l'Andra et préconisé de nouveaux développements. La solution de référence de l'Andra pour la mémoire à long terme de ses centres de stockage, qui découle de ces premières réflexions, comporte actuellement :

- trois dispositifs dits de « mémoire passive » :
 - ✓ la mémoire détaillée constituée de toute la documentation technique nécessaire à la surveillance, la compréhension et la modification d'un centre de stockage. La constitution de la mémoire détaillée s'appuie sur la sélection et la hiérarchisation des informations par des scénarios d'évolution possible identifiés en cohérence avec l'approche de sûreté à long terme. Un ensemble d'instruments de recherche (inventaires, glossaire, index, résumés) en assure l'accessibilité et la compréhension. La pérennité des documents repose sur une sélection adaptée du couple « encre / papier permanent » et la conservation de deux exemplaires sur des sites distincts, le site de stockage et les Archives Nationales. Enfin la validité et la mise à jour de la mémoire détaillée sont assurées par des versements complémentaires, tous les 5 ans et jusqu'au terme de la phase de surveillance ;
 - ✓ la mémoire de synthèse est un document unique avec une approche synthétique d'informations techniques et historiques, destiné aux décideurs et aux publics. Des mises à

- jour sont prévues après chaque révision des rapports de sûreté. La force informative de la version définitive reposera sur sa grande diffusion : mairies, notaires, associations, conseil général, préfecture, ministères, institutions nationales et internationales... ;
- ✓ l'inscription au cadastre de servitudes d'utilité publique assure une signalétique administrative du site avertissant du risque potentiel d'entreprendre des travaux sur ce site ;
 - deux dispositifs dits de « mémoire active » :
 - ✓ le développement de la communication avec les publics grâce à l'organisation de journées portes ouvertes, de conférences, d'expositions ou d'interviews, ainsi que par la diffusion d'outils de communication spécifiques à la mémoire, plaquettes et site Internet ;
 - ✓ le renforcement du rôle des commissions locales d'information (CLI) dont la question de la mémoire fait partie des thématiques abordées et doit permettre de la faire vivre localement.

L'analyse de ce dispositif, notamment au regard du retour d'expérience sur la durabilité d'autres dispositifs mémoriels historiques amène à conclure à une bonne confiance pour sa durabilité sur quelques siècles.

Pour augmenter la robustesse de ce dispositif eu égard aux besoins des générations futures dont il est difficile de vraiment bien les imaginer sur le long terme, l'Andra fait expertiser de façon décennale son dispositif par des experts français et internationaux de sorte à réévaluer continuellement son adéquation aux besoins de ces générations futures.

En termes de modalités de réalisation, tous les documents de la solution de référence sont édités sur du « papier permanent » dont les caractéristiques sont définies par deux normes internationales (ISO 9706 pour les exigences de permanence, et ISO 11108 pour les exigences de durabilité). Les caractéristiques particulières de ce papier (pH légèrement basique, faible teneur en lignine, résistance élevée à la déchirure) lui confèrent une durabilité supérieure à celle des papiers usuels. Des études commanditées par l'Andra entre 2007 et 2009 ont montré une durabilité par vieillissement naturel comprise entre 6 et 10 siècles, encrage compris, ce qui couvre la période réglementaire actuellement définie pour tous les stockages réalisés et à venir.

▪ *Le programme mémoire de l'Andra*

La solution de référence ne peut cependant être considérée, sans examen plus approfondi, comme correspondant à la meilleure solution disponible. Elle présente par ailleurs certains points de fragilité : elle est très orientée sur la conservation de documents, et ne considère pas assez d'autres supports. La réflexion sur son adéquation aux besoins potentiels des générations futures n'a pas fait l'objet d'un recul suffisant (une seule évaluation décennale réalisée à fin 2015). Enfin une conservation de la mémoire assurée pour « seulement » quelques siècles après la fermeture du stockage est estimée trop courte par plusieurs des parties prenantes de ce stockage, dont les futurs riverains.

En conséquence, l'Andra a décidé en 2010 de lancer un programme mémoire avec une double finalité : augmenter la robustesse de la solution de référence et développer les réflexions et les études sur la mémoire plurimillénaire.

Le programme mémoire comprend d'une part des travaux visant à poursuivre la constitution de la mémoire des centres et l'amélioration de celle-ci, et d'autre part des études scientifiques qui s'articulent autour de deux domaines : le vieillissement de matériaux et les sciences humaines et sociales (SHS).

En ce qui concerne la constitution de la mémoire des centres et son amélioration, les travaux suivants sont engagés :

- la pertinence du dispositif mémoriel du CSM face aux besoins des générations futures est analysée tous dix ans en réunissant un groupe de parties prenantes internationales afin de s'interroger périodiquement sur son adéquation et sa complétude ;
- la préparation la mémoire de Cigéo est engagée : constitution de la mémoire détaillée du Laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne, et des autres éléments justificatifs, en amont de la création de Cigéo (sélectionner parmi tout ce qui a été produit depuis le début des années 1980 ce qui doit être conservé comme éléments ayant permis de décider de créer Cigéo) ;

- l'utilité « technique » de la mémoire doit être explicitée, pour préciser quels sont les bénéfices de la mémorisation pour la sûreté à long terme ;
- l'Andra anime, autour de ses sites des groupes de réflexions afin d'intéresser les populations locales à cette problématique, mais aussi de recueillir leurs idées sur la façon dont localement elles pourraient se l'approprier, avec l'objectif à terme que se créent des associations de préservation du patrimoine laissé par l'Andra ;
- des collaborations avec plusieurs artistes français et internationaux sont mises en place, dans des domaines artistiques différents, pour bénéficier de leur vision de la problématique de la mémoire des stockages au travers de leur art ;
- l'Andra participe aux travaux internationaux sur la mémoire dans le cadre des groupes de travail AEN/RWMC/RK&M (mémoire à long terme) et RepMet (préservation des métadonnées) : benchmark des pratiques des différents pays participants, définitions et bibliographie communes, et élaboration de recommandations ;
- la création d'espaces dédiés à la mémoire dans les lieux d'accueil du public de l'Andra ;
- l'étude de la création d'un centre d'archivage historique et de mémoire, avec délégation des Archives de France.

Les études scientifiques sur le vieillissement des matériaux ont tout d'abord consisté à tester le couple encre/papier via des essais normés. Des études de la durabilité d'autres supports pour le plus long terme sont en cours de définition. Elles porteront sur des supports hors papier pour écrire et graver, notamment des études de marqueurs de surface à installer sur la couverture des centres et la réalisation de disques en saphir comme démonstrateurs d'un support mémoriel jusqu'à l'échelle du million d'années.

Au niveau des sciences humaines et sociales, un groupement de laboratoires a été constitué pour étudier la perception des grandes échelles de temps. Pour les autres sujets (archivistique, linguistique, sémiologie, muséographie, archéologie des techniques et des paysages...), il est fait une approche en trois temps : une bibliographie succincte permettant de voir si des travaux existent déjà et sont suffisants, sinon, une bibliographie approfondie faite avec des universitaires afin de cadrer, le cas échéant, des recherches à insérer dans le programme scientifique. Les travaux porteront sur les sujets suivants :

- la pérennité :
 - ✓ des langues et de la symbolique pour déterminer pendant quelle durée raisonnable les langues actuelles ou mortes peuvent être connues, et quelles pourraient être les solutions de communication lorsque ces langues auront cessé d'être connues ;
 - ✓ des conservations institutionnelles des écrits, sons, images, objets... par les organismes spécialisés français, mais aussi internationaux, pour analyser les mesures préventives qui sont prises pour limiter la dégradation avec le temps et favoriser l'appropriation et la transmission par les générations futures ;
 - ✓ de l'archivage numérique de longue durée, notamment en organisant une veille sur ce domaine qui commence à se structurer et qui, à l'horizon de quelques décennies, pourrait ouvrir de nouveaux horizons sur le long terme ;
- la temporalité et les vestiges :
 - ✓ archéologie des techniques et des paysages, intégrant l'évolution d'origine anthropique et l'évolution géodynamique ainsi que les possibilités mémorielles au sein même des créations humaines (utilisation du remblayage des liaisons surface-fond comme un outil de mémorisation) ;
 - ✓ mémoire des stockages « historiques » non gérés par l'Andra, qui existent dans différents lieux en France (mines d'uranium, essais nucléaires...) ;
- la dimension sociétale de la problématique :
 - ✓ perception des grandes échelles de temps (plurimillénaire et plus) par le public, dans le cadre d'un groupement de laboratoires en sciences humaines et sociales,
 - ✓ évolutions sociétales possibles en science, technologie, humanité... déclinées en trois grandes orientations (régression, stagnation, progression) ;

- ✓ intégration de la préservation de la mémoire des stockages aux programmes d'enseignement sur le nucléaire, le patrimoine et la mémoire ;
- ✓ transmission intergénérationnelle de la mémoire via les réseaux sociaux sur Internet pour informer au niveau mondial sur la mémoire des centres de stockage.

Le programme mémoire est rythmé par les jalons décisionnels du projet Cigéo. Il se prolongera pour accompagner le développement du stockage et sa fermeture progressive.

Annexe 2 : Règlementation générale applicable

Tableau 2.4-1 : Textes réglementaires

Thème	Texte	Référence
Nucléaire	Code de l'environnement- Partie législative Livre 1er : Dispositions communes Titre II : Information et participation des citoyens Chapitre V : Autres modes d'information – section 1 : Dispositions relatives aux activités autres que les activités nucléaires (L 125 et suivants)	(30)
Nucléaire	Code de l'environnement- Partie législative Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances Titre IV : Déchets Chapitre II : Dispositions particulières à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs (L 542 et suivants)	(31)
Nucléaire	Code de l'environnement- Partie législative Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances Titre IX : La sécurité nucléaire et les installations nucléaires de base – Chapitre 1er : Dispositions générales relatives à la sécurité nucléaire (L 591 et suivants)	(32)
Nucléaire	Code de l'environnement- Partie législative Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances Titre IX : La sécurité nucléaire et les installations nucléaires de base – Chapitre III : Installations nucléaires de base (L 593 et suivants)	(33)
Nucléaire	Décret n°2007-1557 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives	(34)
Nucléaire	Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base	(15)
Protection contre les rayonnements ionisants	Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants	(35)
Impact sur l'environnement	Arrêté du 9 août 2013 portant homologation de la décision n° 2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base	(36)

Annexe 3 : Standards et textes internationaux

Tableau 2.4-2 : Standards internationaux

Source	Date de publication	Référence	Titre
WENRA ¹³⁹	2014	(37)	Radioactive waste disposal facilities Safety reference levels
AIEA	2006	(38)	SF-1 : Fondamental Safety Principales
	2011	(39)	SSR-5 : Disposal of Radioactive Waste
	2006	(40)	GS-R-3 The management system for Facilities and Activities

Tableau 2.4-3 : Bonnes pratiques internationales

Source	Date de publication	Référence	Titre
AEN	2012		Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste ISBN : 978-92-64-99190-3
	2009		Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste ISBN : 978-92-64-06058-6
	2009		International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC). Outcomes of the INTESC ISBN : 978-92-64-99103-3
	2004		ISBN : 92-64-02075-6
AIEA	2009		GSR Part 4 Evaluation de la sûreté des installations et activités
	2009		GSG-1 Classification of radioactive waste
	2014	(41)	SSG-31 Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities
	2012	(42)	SSG-23 The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste
	2011	(43)	SSG-14 Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste
	2008	(44)	GS-G-3.4 The Management System for the Disposal of Radioactive

¹³⁹ Western European Nuclear Regulators Association

Source	Date de publication	Référence	Titre
	1996	(45)	INSAG-10: Defense in Depth in Nuclear Safety

Tableau 2.4-4 : Liste des CIPR

Source	Date de publication	Référence	Titre
CIPR	2013	(46)	CIPR n°122 Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste
	2007	(47)	CIPR n°103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
	2007	(48)	CIPR n°101 Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimization of Radiological Protection

Annexe 4 : Outils de modélisation

1. Le compartiment de l'échelle « colis-alvéole » : il comprend l'intégralité des composants constituant l'alvéole HA ou l'alvéole MA-VL (conteneurs, sur-conteneurs, jeux fonctionnels, béton de revêtement/soutènement) et l'environnement en champ proche des alvéoles : les zones à fracturation diffuse et connectée, les zones perturbées thermiquement (HA) et chimiquement (MA-VL), et le Callovo-Oxfordien sain sur toute son épaisseur.

Ce calcul à l'échelle de l'alvéole permet de quantifier les débits molaires de solutés (i) entrant et restant dans le Callovo-Oxfordien, et (ii) entrant et restant dans la galerie d'accès pour l'alvéole HA et dans les galeries de liaison et de retour d'air pour l'alvéole MA-VL (Figure 2.4-1).

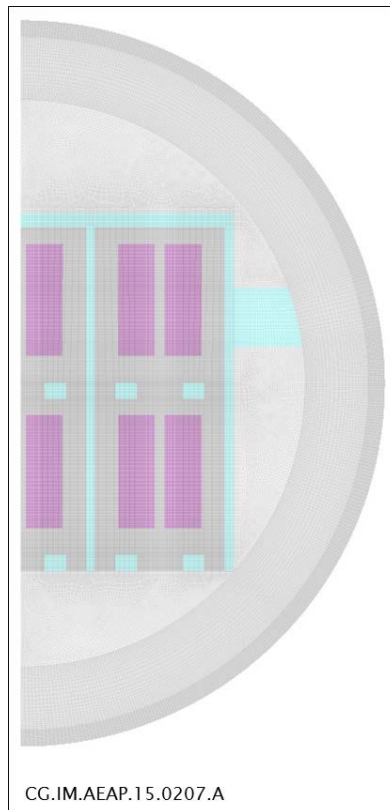


Figure 2.4-1 : *Compartiment de l'échelle "colis alvéole" : représentation d'un demi-alvéole MA-VL incluant les colis de stockage et les colis primaires*

2. Le compartiment de l'échelle « stockage » : il comprend les différents quartiers de stockage avec l'ensemble des alvéoles, le système de galeries et leurs ouvrages de fermeture, le système d'ouvrages de liaison surface-fond et leurs ouvrages de fermeture, les différentes zones de Callovo-Oxfordien (perturbées) et le Callovo-Oxfordien sur toute son épaisseur. Chaque alvéole est représentée de manière simplifiée, afin de pouvoir prendre en compte la quantité d'eau drainée en provenance du milieu géologique, et reproduire au mieux la cinétique convective des solutés dans les composants ouvragés. Les débits molaires entrant dans les galeries, obtenus à l'échelle « colis-alvéole », sont appliqués directement dans les galeries correspondantes comme des termes sources volumiques dans ce compartiment « stockage ».

A cette échelle également il est réalisé une quantification des deux voies de transfert des que sont (i) la voie de transfert par le milieu géologique, et (ii) la voie de transfert par les ouvrages de stockage.

3. Le compartiment à l'échelle « milieu géologique » : le modèle comprend la zone de stockage, le Callovo-Oxfordien et ses encaissants sus et sous-jacents jusqu'aux exutoires Figure 2.4-2. La géométrie de chaque quartier de stockage est assimilée, de manière macroscopique, à une boîte de stockage parallélépipédique, enveloppe des alvéoles la constituant. Les débits molaires sortant

des ouvrages de liaison surface-fond (au toit du Callovo-Oxfordien) à l'échelle « stockage » sont appliqués directement à ce même endroit dans le milieu géologique multicouche sous forme d'un terme source volumique.

A cette échelle, il est mis en évidence les débits molaires de solutés sortant au niveau des différents exutoires, ceci dans le but de quantifier les impacts radiologiques par la suite (modèle biosphère).

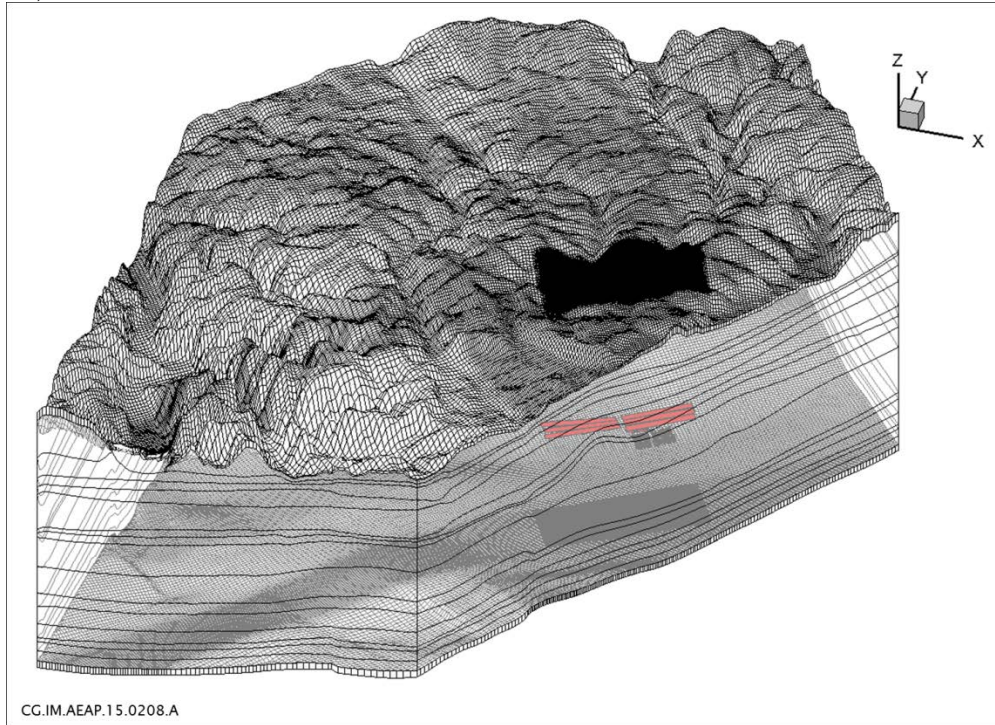


Figure 2.4-2 : *Compartiment de l'échelle "milieu géologique" représentant du milieu géologique multicouches et du stockage Cigéo*

Annexe 5 : La démarche « biosphère » retenue par l'Andra

Selon la figure 5.7.2 du volume I, la démarche « biosphère » se décline selon les étapes suivantes :

- **La définition du contexte de l'évaluation**

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)**

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 traitées 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**, 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 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 ;
 - o 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 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 chimiques vers l'homme**

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***

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

ANNEXES DU VOLUME II

Annexe 1 : Liste des familles de déchets MA-VL

Déchets salins avec matrice bitume (boues bitumées)

Enrobés bitumineux de La Hague (COG-020, COG-420)

La famille COG-020 correspond aux boues traitées et conditionnées par enrobage dans du bitume, dans la station de traitement des effluents n°3 (STE3) de La Hague.

La famille COG-420 correspond au bitumage d'une fraction des boues issues du traitement des effluents sur STE2 et entreposées dans le silo 550-14 de La Hague.

Enrobés bitumineux de Marcoule produits avant 1995 (CEA-1020, CEA-1021)

Ces familles regroupent l'ensemble des colis de boues bitumées produits à la STEL de Marcoule entre 1966 et la mise en place du « suivi qualité produit » en 1995. Ces colis sont conditionnés dans des fûts en acier non allié. Un certain nombre de colis a déjà fait l'objet d'opérations de reprise consistant à les placer en surfûts EIP : ces nouveaux colis sont entreposés à l'EIP.

Enrobés bitumineux de Marcoule produits après 1995 (CEA-1000, CEA-1010)

Ces familles regroupent l'ensemble des colis de boues bitumées produits depuis la mise en place du « suivi qualité produit » en 1995. Une partie de ces colis est conditionnée dans des fûts en acier non allié (CEA-1010), l'autre (depuis 1996) dans des fûts en acier inoxydable (CEA-1000).

Déchets salins non bitumés (boues non bitumées)

Boues STE2, séchées, compactées et immobilisées dans un conteneur métallique de La Hague (COG-430)

Les boues dites "STE2" sont des précipités fixant l'activité contenue dans les effluents secondaires de faible et moyenne activité de l'usine de La Hague. Elles proviennent essentiellement du fonctionnement de l'usine UP2-400 entre 1966 et 1997 et sont entreposées dans 7 silos numérotés 550-10 à 550-15 et 550-17 de l'ancienne Station de Traitement des Effluents (STE2). Le procédé actuellement retenu pour le conditionnement de ces boues est le séchage avant compactage des boues sous forme de pastilles qui seront ensuite conditionnées dans des fûts en acier inoxydable.

Déchets métalliques compactés

Déchets compactés du silo HAO de La Hague (COG-070)

La famille COG-070 regroupe les colis qui proviennent du compactage des déchets entreposés dans le silo de l'atelier HAO (Haute Activité Oxyde).

Colis standards de déchets compactés de La Hague (COG-100, COG-110)

Sur l'usine Areva NC de La Hague, le compactage constitue le procédé actuel de conditionnement des déchets de structure des assemblages combustibles et de quelques déchets technologiques métalliques. Il est mis en œuvre dans l'Atelier de compactage des coques (ACC). Les CSD-C, pouvant être considérés pour un stockage à Cigéo à partir de 2025 par le PIGD, correspondent :

- pour la famille COG-100, à ceux produits actuellement suivant la spécification 300AQ 055 et issus du traitement de combustibles UOX ;
- pour la famille COG-110, à ceux prévus d'être produits à partir de 2014 issus du traitement de combustibles UOX et prenant en compte les actuels et nouveaux types de gainages.

Déchets de structures métalliques compactés de La Hague (COG-120, COG-450, COG-530, COG-540, COG-550)

Ces colis proviennent du compactage des déchets de structure résultant de traitements futurs de combustibles UOX, URE, MOX en mélange (COG-120), de combustibles des réacteurs à neutrons rapides Phénix et Superphénix (COG-450), des combustibles du CEA (COG-530 pour le CEA/Civil et COG-540 pour le CEA/DAM) et de ceux du réacteur EL4 de Brennilis (COG-550).

Déchets métalliques avec matrice ciment

Colis de coques et embouts cimentés de La Hague (CEC, COG-040)

Pendant la période 1990-1995, les déchets de structure étaient cimentés dans des fûts en acier inoxydable, suivant la spécification 300 AQ 25 ; cette pratique a été remplacée à partir de 2002 par le compactage décrit ci-dessus.

Déchets de structures métalliques cimentés de Marcoule (CEA-1050)

Cette famille regroupe les déchets de structure métalliques des combustibles, autres que ceux des réacteurs UNGG (combustibles Phénix, combustibles OSIRIS...), traités à l'usine UP1 (Marcoule) ; ils se composent de différents matériaux : aluminium, acier inoxydable, alliage de nickel, alliage de zirconium-étain... suivant le type de combustible considéré. Ces déchets seront repris en l'état, placés en fût de 380 litres puis bloqués par une matrice cimentaire.

Déchets de structures magnésiens de Marcoule (CEA-1060)

Les déchets de structure magnésiens sont constitués des gaines et des bouchons (ou queusots) des combustibles des réacteurs UNGG traités sur le site de Marcoule. Ils contiennent du magnésium mais également de l'aluminium. Ces déchets devraient être repris, conditionnés puis bloqués en fûts de 223 litres en acier inoxydable selon l'hypothèse actuellement retenue par le CEA. La définition du matériau qui sera retenu pour le blocage de ces déchets est en cours.

Déchets activés (EDF-080, EDF-090)

Ces familles regroupent des composants divers qui ont été exposés au flux de neutrons lors de leur séjour en réacteur. Elle comprend des déchets activés d'exploitation des réacteurs à eau pressurisée (REP) du parc actuel (EDF-080) et des déchets activés de déconstruction des réacteurs de première génération ainsi que des déchets de déconstruction non sodés du réacteur à neutrons rapides Superphénix (EDF-090).

Déchets MA-VL vitrifiés

Effluents de rinçage vitrifiés (COG-470, CEA-1120)

Le conditionnement retenu pour certains effluents de moyenne activité produits lors des opérations de rinçage effectuées dans le cadre de la mise à l'arrêt définitif de l'usine UP2-400 (COG-470) ou de l'atelier de vitrification de Marcoule (CEA-1120) est une vitrification et un conditionnement dans des conteneurs identiques à ceux utilisés pour les déchets vitrifiés de haute activité sur les sites correspondants.

Effluents américiés vitrifiés (CEA-340)

Le traitement de produits recyclables contenant du plutonium produit des effluents contenant de l'américium, du plutonium et de l'uranium. Ces effluents sont actuellement entreposés sur le site de Valduc. L'hypothèse retenue pour leur conditionnement est une vitrification dans une installation à construire sur le site de Valduc puis un conditionnement dans un conteneur standard du type de ceux utilisés sur le site de La Hague. Les déchets vitrifiés ainsi produits seront de faible thermicité, ce qui permet de les rattacher à la catégorie MA-VL.

Autres déchets MA-VL

Colis de déchets technologiques cimentés de La Hague (COG-030 et COG-050)

La famille COG-050 correspond aux colis, produits entre 1990 et 1994, de déchets technologiques enrobés dans du ciment dans des conteneurs en amiante-ciment (CAC) et non susceptibles d'un stockage en surface.

Ces conteneurs ont ensuite été remplacés par les conteneurs béton fibres (CBF-C'2) (COG-030). La majorité des déchets technologiques solides de l'usine de La Hague dont la contamination ne permet pas d'envisager un stockage en surface est conditionnée en CBF-C'2. Ces déchets sont constitués de matériaux métalliques ou organiques. Ils sont collectés dans des étuis ou des fûts métalliques ou dans des poubelles en polyéthylène, ces emballages étant ensuite bloqués à l'intérieur des CBF-C'2 au moyen de béton fibré.

Déchets alpha en provenance de MELOX et de La Hague (COG-400)

Cette famille regroupe les colis de déchets solides essentiellement contaminés par du plutonium lors des opérations de fabrication de combustibles MOX (usine MELOX et centre de fabrication de combustible de Cadarache), ou de traitement de combustibles (usines de La Hague). Il s'agit de déchets divers de natures métalliques (outillages, câbles...) ou organiques (gants, manches d'extraction...). Des colis de déchets issus des opérations préalables à la cessation définitive d'exploitation et au démantèlement d'installations de l'usine UP2-400 de La Hague sont également rattachés à cette famille. L'hypothèse de conditionnement précédemment retenue par AREVA était un compactage. Suite à la demande de l'ASN, AREVA étudie actuellement un conditionnement alternatif à ce compactage direct, il s'agit d'un procédé d'incinération / fusion / vitrification. Le colis correspondant est le colis PIVIC qui est considéré en référence dans les études d'APD.

Déchets métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique (CEA-050, CEA-060, CEA-090, CEA-270, CEA-330, CEA-1100)

Cette famille regroupe les colis de déchets solides d'exploitation, de maintenance ou de démantèlement du CEA fortement contaminés en alpha, conditionnés en conteneurs en acier non allié. Ces déchets sont constitués essentiellement de matières métalliques et plastiques. Les déchets primaires proviennent du centre de Cadarache et d'autres centres du CEA. Ils peuvent être compactés ou non puis bloqués par un matériau cimentaire dans des conteneurs.

Déchets alpha de Marcoule en fûts de 200 litres (CEA-1180)

Il s'agit de déchets technologiques solides produits par l'installation UPI et contaminés en émetteurs alpha purs. Les déchets étaient vinylés sous double enveloppe, conditionnés dans des fûts de 100 litres ou de 118 litres puis compactés sous la forme de galettes. Ces galettes sont conditionnées dans des fûts en acier noir ou acier inoxydable de 200 litres et elles sont alors bloquées par du gravier et immobilisées par un coulis de mortier.

Déchets cimentés du silo HAO de La Hague (COG-440)

La famille COG-440 regroupe les colis qui seront produits par le conditionnement des déchets de procédé de faible granulométrie (fines de dissolution/clarification, résines et quelques fines de cisailage) entreposés dans le silo de l'atelier HAO (Haute Activité Oxyde). L'hypothèse de conditionnement actuellement retenue par AREVA est une cimentation des déchets dans des fûts en acier inoxydable.

Déchets compactés (COG-460)

Le procédé de compactage mis en œuvre à La Hague pour le conditionnement des déchets de structure de combustibles usés sera aussi utilisé dans les années à venir pour conditionner certains déchets d'exploitation et de démantèlement de l'usine UP2-400 en colis CSD-C : ces colis sont regroupés dans la famille COG-460.

Déchets bloqués dans une matrice ciment-bitume de Cadarache (CEA-080, CEA-110, CEA-300)

Cette famille regroupe les colis de déchets solides d'exploitation, de maintenance ou de démantèlement du CEA, faiblement irradiants, conditionnés en conteneurs en acier non allié et bloqués par un matériau à base de ciment et de bitume. Cette production est terminée depuis 1990.

Déchets bloqués dans un liant hydraulique (CEA-120, CEA-290, CEA-440, CEA-480, CEA-1090)

Cette famille regroupe les colis de déchets solides d'exploitation, de maintenance, d'assainissement ou de démantèlement du CEA, moyennement irradiants. Ces déchets sont conditionnés en fûts métalliques et proviennent des différents centres du CEA (Fontenay aux Roses, Saclay, Cadarache, Valduc, Marcoule...) ; ils sont essentiellement constitués de matières métalliques, cellulosiques ou plastiques, de caoutchouc, de plâtres, de peintures et de verreries.

Déchets bloqués dans un liant hydraulique de La Hague (COG-480)

Cette famille regroupe les déchets issus du démantèlement de l'ancienne usine de traitement des combustibles irradiés de La Hague, UP2-400, qui seront conditionnés en conteneurs en béton-fibres et bloqués par du ciment dans les prochaines années.

Déchets irradiants à reconditionner du CEA (CEA-400, CEA-410, CEA-420)

Ces familles regroupent les déchets irradiants qui sont ou seront produits par l'exploitation, l'assainissement et le démantèlement de certaines installations du CEA. Ces déchets seront placés en conteneurs d'entreposage DIADEM et entreposés dans la future installation DIADEM. Le reconditionnement des déchets contenus dans les conteneurs DIADEM en vue de leur stockage reste à définir.

Boues ou concentrats d'évaporation enrobés dans un liant hydraulique (CEA-070, CEA-100, CEA-140, CEA-150, CEA-280, CEA-310, CEA-320, CEA-1040, CEA-1140)

Concernant les colis déjà produits, ils résultent du conditionnement des boues de filtration ou de concentrats d'évaporation issus des stations de traitement des effluents des installations de Cadarache, de Fontenay-aux-Roses ou de Valduc. Les boues ont été traitées chimiquement, mélangées à du ciment, puis conditionnées en fûts métalliques en acier non allié. Les concentrats ont été enrobés dans une matrice à base de ciment et conditionnés en fûts métalliques. Certains de ces colis ont été placés dans des coques en béton ou des conteneurs en acier, de façon définitive ou non.

Concernant les colis à produire, ils concernent :

- d'une part les déchets de procédé d'origines diverses liés à l'exploitation de l'usine UP1 de Marcoule et aux opérations de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement de l'usine ; le conditionnement retenu à ce stade par le CEA est un enrobage des déchets dans une matrice cimentaire et la mise en fûts en acier inoxydable ;
- d'autre part les boues de co-précipitation issues du traitement des effluents du site de Marcoule, actuellement bitumées, qui seront dans l'avenir cimentées et conditionnées en fûts en acier inoxydable.

Déchets de démantèlement des REP (EDF-100)

Il s'agit des déchets qui seront produits lors du démantèlement des REP. Le scénario actuel retenu par EDF est une mise en conteneur métallique optimisé. L'installation qui permettra le conditionnement de ces déchets sera définie en lien avec la déconstruction des premières tranches REP.

Déchets issus des opérations de CDE DEM des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 compactés en CSD-C (COG-490)

Le procédé de compactage mis en œuvre à La Hague pour le conditionnement des déchets de structure de combustibles usés sera aussi utilisé dans les années à venir pour conditionner certains déchets de démantèlement des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 en colis CSD-C.

Déchets de démantèlement des laboratoires et usines bloqués dans un liant hydraulique (CEA-460, COG-500, COG-510, COG-520)

Les déchets de démantèlement des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 de La Hague ainsi que ceux liés à déconstruction des installations du centre de Valduc seront bloqués par un liant hydraulique à l'intérieur d'un conteneur béton-fibres ou métallique.

Déchets activés (CEA-360)

Cette famille concerne les déchets activés de déconstruction non sodés du réacteur à neutrons rapides Phénix.

Sources scellées usagées (CEA-450, CEA-1510, EDF-110)

Ces familles regroupent des sources scellées usagées diverses (sources neutroniques, à l'uranium naturel, au radium, au plutonium, à l'américium) de diverses provenances : CEA (qui a repris beaucoup de sources usagées, en tant que fournisseur), EDF (crayons sources primaires et secondaires des REP...). Certaines d'entre elles sont déjà conditionnées dans des conteneurs en béton ou métalliques.

Déchets sodés (EDF-250, CEA-380)

Il s'agit des aiguilles de carbure de bore (B4C) qui proviennent des assemblages de commande des réacteurs à neutrons rapides Superphénix (EDF-250) d'une part, Phénix et Rapsodie (CEA-380) d'autre part. Ces aiguilles sont susceptibles de contenir du sodium résiduel qui n'aurait pas été éliminé lors des opérations de lavage des barres de commande.

Fûts de sulfates de plomb radifères provenant de l'usine du Bouchet (CEA-231, CEA-232)

L'usine CEA du Bouchet (Essonne), qui a traité entre 1958 et 1970 du minerai importé, l'uranothorianite, pour en extraire de l'uranium et du thorium, a produit des résidus radioactifs : les sulfates de plomb radifères issus de la décontamination des pieds de colonne d'extraction du minerai. Ces résidus ont été conditionnés sur place en fûts métalliques puis ont subi des reconditionnements successifs.

Déchets essentiellement métalliques divers à conditionner ou à reconditionner (CEA-370, CEA-430, CEA-1110, CEA-1151, CEA-1152, CEA-1200, EDF-120)

Les familles CEA regroupent des déchets irradiants qui ont été, sont ou seront produits par l'exploitation, l'assainissement et le démantèlement de certaines installations du CEA. Il est prévu de placer la plupart d'entre eux en conteneurs d'entreposage DIADEM et de les entreposer dans la future installation DIADEM. Le conditionnement des déchets contenus dans les conteneurs DIADEM en vue de leur stockage reste à définir. Pour d'autres, le conditionnement reste à définir.

La famille EDF-120 est constituée des déchets entreposés dans les puits de l'AMI (Atelier des Matériaux Irradiés) à Chinon. Ils proviennent principalement d'activités d'expertises. Ils se composent d'une grande diversité de déchets issus des filières REP et UNGG. Les modalités de conditionnement de ces déchets ne sont pas définies à ce jour.

Déchets divers produits pendant les phases d'exploitation, de maintenance et de déconstruction du réacteur ITER (ITER-010)

Les déchets d'ITER seront produits par le remplacement de composants lors de l'exploitation et par leur retrait après mise à l'arrêt définitif. Ces déchets se caractérisent par leur contenu en tritium et en produits d'activation et par les natures de certains des déchets.

Déchets collectés par l'Andra conditionnés en conteneur 870L (AND-000)

Les déchets collectés par l'Andra comprennent :

- des objets au radium à usage médical (ORUM) (AND-050), constitués d'aiguilles et de tubes métalliques de très petites dimensions, contenant chacun quelques milligrammes de radium. Le radium est incorporé sous une forme chimique solide et insoluble (sulfate ou chlorure). L'Andra envisage un conditionnement des ORUM en conteneur 870 L ;
- des sources de détecteurs ioniques, pour lesquelles l'hypothèse de conditionnement retenue à ce stade est le fût de 870 L ;

- des sources de paratonnerres, à l'américium ou au radium, conditionnées en conteneur 870 L ;
- des sources scellées usagées collectées par l'Andra, notamment dans le cadre de sa mission de service public. Leur conditionnement est aussi prévu en conteneur de 870 L ;
- 4 fûts de 200 litres de silice contaminées au carbone 14 provenant de la société Isotopchim qu'il est aussi prévu de reconditionner en 870 L.

Les filières de gestion à long terme de ces déchets collectés par l'Andra, non susceptibles d'un stockage en surface, font l'objet d'études. A ce stade, l'estimation du volume de tels déchets qui seraient destinés à Cigéo est de 18 m³, correspondant à 19 colis de 870 L.

Le tableau récapitulatif ci-après reprend les identifiants des familles MA-VL en indiquant leur correspondance avec l'Inventaire national (Version 2012) et leur nombre.

Identifiant Famille	Intitulé Famille	Identifiant Edition 2012 de l'IN	Nombre de colis
AND-000	Déchets collectés par l'Andra conditionnés en conteneur 870L	S01	19
CEA-050	Conteneurs 870 litres en acier non allié produits sous spécification d'assurance qualité (à partir du 01/01/94) contenant des déchets divers (alpha Pu prépondérant) bloqués dans un liant hydraulique	F2-5-04	3 550
CEA-060	Conteneurs en acier de 500 litres produits depuis 1994 sous spécification d'assurance qualité et contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	F2-5-05	1 250
CEA-070	Conteneurs en béton de 500 litres contenant des fûts de boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique produits sous spécification d'assurance qualité	F2-5-02	43
CEA-080	Conteneurs 870 litres en acier non allié produits de 1972 à 1990 contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	F2-5-04	2 188
CEA-090	Conteneurs 870 litres en acier non allié produits de 1990 à fin 1993 contenant des déchets divers (alpha Pu prépondérant) bloqués dans un liant hydraulique	F2-5-04	562
CEA-100	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des fûts de 700 litres de concentrats à 800 g/l enrobés dans un liant hydraulique	F2-5-03	40
CEA-110	Conteneurs 500 litres en acier non allié produits de 1970 à 1990 contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	F2-5-05	427
CEA-120	Conteneurs 500 litres en acier non allié produits de 1990 à 1994 contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	F2-5-05	210
CEA-140	Conteneurs en béton de 500 litres produits avant 1994 et contenant des fûts de boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique	F2-5-02	2 297
CEA-150	Conteneurs en béton de 500 litres contenant des fûts de concentrats d'évaporation enrobés dans un liant hydraulique	F2-5-02	381
CEA-231	Fûts de sulfates de plomb radifères provenant de l'usine du Bouchet conditionnés en conteneurs béton de 5 m ³	F2-5-01	19
CEA-232	Fûts de sulfates de plomb radifères provenant de l'usine du Bouchet conditionnés en conteneurs EIP		952
CEA-270	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique (CEA/DAM/Valduc)	F2-5-04	415
CEA-280	Fûts 223 litres en acier non allié contenant des boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique (y compris fûts produits sous spécification d'assurance qualité)	F2-5-02	2 149
CEA-290	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs en béton 1800 litres contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	F2-5-06	169
CEA-300	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs en béton 1800 litres contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	F2-5-06	11
CEA-310	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs en béton 1000 litres contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume ou un mélange boues-ciment	F2-5-06	88
CEA-320	Fûts en acier contenant des boues ou concentrats ou un mélange de boues-concentrats cimentés	F2-6-02	360
CEA-330	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des déchets métalliques et organiques "Pegase"	F2-5-04	619
CEA-340	Conteneur standard de déchets (CSD) contenant des effluents américains vitrifiés (verre MAVL Valduc)	F2-6-03	300
CEA-360	Déchets issus du DEMdes objets du cœur de Rhenix	F2-4-12	781
CEA-370	Objets exotiques de Rhenix	F2-4-12	8
CEA-380	Déchets divers contenant du B4C issus des phases d'exploitation et de DEMdes réacteurs RNR Rapsodie et Rhenix	F2-4-15	3
CEA-400	Déchets irradiants issus du DEMde Rapsodie, de l'assainissement des fosses de CADARACHE et de l'exploitation et du DEMdu RJH	-	200
CEA-410	Déchets irradiants issus de l'exploitation et du DEMde diverses installations de SACLAY	-	300
CEA-420	Déchets issus de l'exploitation et du DEMde diverses installations de FONTENAY-aux-ROSES	-	230
CEA-430	Déchets divers issus des phases d'exploitation, d'assainissement et de DEMde diverses installations du Centre de GRENOBLE	DIV2	40
CEA-440	Conteneurs 500 litres en acier inoxydable contenant des déchets divers non compactables bloqués dans un liant hydraulique (exploitation CABR), DEMRapsodie, fosses CAD, CENC)	F2-5-05	2 000
CEA-450	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs bétons dits "Blocs sources"	F2-9-01	41
CEA-460	Déchets de déconstruction des installations du centre CEA Valduc	-	40
CEA-480	Collis 225 litres pré-bétonnés hors normes	DIV2	50
CEA-1000	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier inoxydable d'enrobés bitumineux produits sous spécification d'assurance qualité (à partir d'octobre 1996)	F2-4-03	2 700
CEA-1010	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits sous spécification d'assurance qualité (de 1995 à 1996)	F2-4-03	1 709
CEA-1020	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits avant 1995, transportés en colis primaires	F2-4-04	12 955
CEA-1021	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits avant 1995, transportés en colis de stockage		11 467
CEA-1040	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets de procédé cimentés	F2-4-10	3 013
CEA-1050	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets de structure métalliques cimentés (y compris le DEMdes Célestins)	F2-4-07	1 320
CEA-1060	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets de structure magnésiens bloqués dans un liant hydraulique	F2-4-09	7 464
CEA-1090	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique	F2-4-11	1 353
CEA-1100	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique (déchets alpha MARCOULE)	F2-5-04	410
CEA-1110	Déchets technologiques issus de l'AVM	F2-4-05	188
CEA-1120	Conteneurs type AVMen acier inoxydable contenant des déchets vitrifiés issus des effluents de rinçage UPI MARCOULE (verres NML)	F2-4-13	147

Identifiant Famille	Intitulé Famille	Identifiant Edition 2012 de l'IN	Nombre de colis
CEA-1140	Fûts en acier inoxydable contenant des boues de filtration cimentées issues de l'installation STEMA	F2-4-10	120
CEA-1151	Déchets de structure, divers déchets métalliques et déchets de DEM des chaînes TOP et TOR, à reconditionner en fûts EIP	F2-4-14	60
CEA-1152	Déchets de structure, divers déchets métalliques et déchets de DEM des chaînes TOP et TOR		450
CEA-1180	Fûts alpha 200 litres entreposés au bâtiment 99 de la zone nord CDS à placer provisoirement dans une coque réversible de 500 litres	DIV2	183
CEA-1200	Déchets divers entreposés dans les bâtiments 211 et 213 (hors contenueurs de déchets vitrifiés PIVER et autres verres HA)	DIV2	50
CEA-1510	Sources radioactives (alpha, neutroniques et divers)	S01	60
COG-020	Fûts bitumes STE3 produits suivant la spécification 300 AQ 027	F2-3-04	11 900
COG-030	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés produits après 1994 suivant la spécification 300 AQ 044	F2-3-08	8 292
COG-040	Fûts de coques et embouts cimentés produits suivant la spécification 300 AQ 025	F2-3-01	1 517
COG-050	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés produits avant 1994 suivant la spécification 300 AQ 038	F2-3-07	324
COG-070	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des coques et embouts du silo HAO	F2-3-02	1 527
COG-100	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C produits suivant la spécification 300 AQ 055 (dont coques et embouts des fûts ECE et des piscines S1, S2 et S3)	F2-3-02	6 675
COG-110	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des coques et embouts issus d'assemblages combustibles UOX	F2-3-02	17 850
COG-120	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des coques et embouts issus d'assemblages combustibles UOX/URE/MOX	F2-3-02	22 720
COG-400	Déchets alpha en provenance de Mélox et LHA	F2-3-10	4 400
COG-420	Fûts enrobés bitumineux STE2 (prise partielle silo 550-14)	F2-3-05	340
COG-430	Boues STE2 séchées, compactées et immobilisées dans un conteneur métallique	F2-3-12	14 429
COG-440	Fûts ECE cimentés de fines et résines du silo HAO	F2-3-13	121
COG-450	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP et RNR (Superphénix et Phénix)	F2-3-02	1 514
COG-460	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des déchets technologiques métalliques et organiques et des déchets de DEM	F2-3-02	500
COG-470	Colis CSD-B contenant des effluents de moyenne activité vitrifiés (MAD UP2-400, UP2-800 et UP3)	F2-3-11	900
COG-480	Colis CBF-C2 contenant des déchets d'exploitation et de DEM (poubelles fosse ATTILA)	F2-3-08	18
COG-490	Déchets issus des opérations de CDE DEM des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 compactés en CSD-C	F2-3-02	4 450
COG-500	Déchets issus des opérations de CDE DEM des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 conditionnés en CBF-C2	F2-3-08	1 051
COG-510	Déchets issus des opérations de CDE DEM de fusine MELOX conditionnés en CBF-C2	F2-3-08	352
COG-520	Déchets issus des opérations de CDE DEM des installations CFCA CADARACHE conditionnés en CBF-C2	F2-3-08	25
COG-530	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU du CEA/Civil	F2-3-02	24
COG-540	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU du CEA/DAM	F2-3-02	400
COG-550	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU EL4	F2-3-02	200
EDF-080	CIPG de DAE REP	F2-2-03	1 200
EDF-090	CIPG de DAD 1er train hors déchets sodés de Superphénix	F2-2-03	700
EDF-100	DAD des REP du parc actuel (dont BCOT)	-	6 360
EDF-110	Crayons sources primaires et secondaires REP et autres sources scellées diverses	S01	20
EDF-120	Déchets AMI Chinon	DIV2	100
EDF-250	Déchets divers contenant du B4C issus des phases d'exploitation et de DEM du réacteur RNR SuperPhénix	F2-4-15	5
ITER-010	Déchets divers produits pendant les phases d'exploitation, de maintenance et de déconstruction du réacteur ITER	-	4 676

Annexe 2 : Liste des familles HA considérées pour Cigéo

Déchets vitrifiés

Colis de déchets vitrifiés CSD-V d'AREVA/La Hague (COG-140, COG-200, COG-800, COG-810, COG-820, COG-830, COG-880, COG-890 et COG-900)

Ces colis sont des conteneurs standards de déchets vitrifiés en acier inoxydable (CSD-V) dans lesquels sont conditionnées les solutions de produits de fission et d'actinides mineurs, calcinées et incorporées dans une matrice de verre, dans les ateliers de vitrification R7 et T7 de La Hague. Les solutions de produits de fission sont issues du traitement de combustibles UOX (COG-140 et COG-800 pour les combustibles à taux de combustion plus élevés), du traitement des combustibles usés du CEA et de ceux du réacteur EL4 de Brennilis (COG-880 pour le CEA/Civil, COG-890 pour le CEA/DAM et COG-900 pour EL4), du traitement des combustibles usés MOX en mélange avec des combustibles usés UOX et URE (COG-200) et du traitement des combustibles usés des réacteurs à neutrons rapides Phénix et Superphénix en mélange avec des combustibles UOX (COG-830).

Des colis de déchets vitrifiés sont également produits lors de la vidange du four de vitrification (COG-810) et à partir de calcinats issus des campagnes de nettoyage du calcinateur (COG-820).

Colis de solutions molybdiques de produits de fission vitrifiés de La Hague (COG-150)

Ces colis résultent de la vitrification des solutions molybdiques de produits de fission selon un procédé analogue à celui utilisé aujourd'hui pour la production des colis de déchets vitrifiés, mais utilisant une technologie dite du « creuset froid », associée à une nouvelle formulation de verre. Ces solutions, entreposées sur le site de La Hague, sont issues du traitement des combustibles usés dits « UMO » (constitués d'alliage d'uranium et de molybdène) utilisés dans les réacteurs uranium-naturel-graphite-gaz (UNGG), maintenant arrêtés.

Colis de déchets vitrifiés de l'Atelier de Vitrification de Marcoule (CEA-1070 et CEA-1080)

Ces colis proviennent des campagnes de vitrification réalisées dans l'Atelier de vitrification de Marcoule (AVM) qui ont débuté en 1978. La production sous spécification d'assurance qualité a démarré en mars 1995 et correspond à la famille CEA-1070. La production antérieure à 1995 correspond à la famille CEA-1080.

Colis de déchets vitrifiés PIVER du CEA/Marcoule (CEA-200 et CEA-1190)

Le développement et la mise au point du procédé de vitrification des déchets ont été réalisés par le CEA dans plusieurs installations de l'atelier pilote de Marcoule (APM), dès le début des années 1960. Ces études ont débouché sur la construction d'un premier pilote industriel de vitrification de solutions de dissolution de combustibles usés (PIVER).

Les solutions de produits de fission vitrifiées dans cette installation provenaient d'une part du traitement de combustibles usés de type Sicral (Si Cr Al : alliage uranium, silicium, chrome, aluminium), utilisés dans les réacteurs de la filière UNGG (Uranium Naturel-Graphite-Gaz), d'autre part du traitement de combustibles à base d' UO_2 irradiés dans le réacteur Phénix à neutrons rapides. Ces colis (CEA-200) ont été produits entre 1969 et 1973 pour les colis de déchets vitrifiés Sicral (94 % du total) et entre 1979 et 1980 pour les colis de déchets vitrifiés Phénix.

Parallèlement, les études ont donné lieu à la fabrication d'échantillons de déchets vitrifiés, conditionnés dans des conteneurs en acier inoxydable de différentes géométries, qui sont aujourd'hui entreposés dans le bâtiment 213 de l'APM (CEA-1190).

Colis de déchets vitrifiés d'Atalante du CEA/Marcoule (CEA-350)

Les recherches menées dans Atalante sur des combustibles UOX et MOX génèrent des effluents radioactifs, qui doivent être vitrifiés dans une chaîne blindée d'Atalante. Le procédé de conditionnement envisagé par le CEA comprend la vitrification des déchets dans des pots métalliques, le regroupement et le blocage des pots à l'intérieur d'un panier avec de la fritte de verre, puis une mise

en conteneur en acier inoxydable de type AVM. La production de ces colis devrait commencer à l'horizon 2030.

Autres déchets HA (sources scellées usagées, déchets technologiques...)

Colis de déchets technologiques issus des ateliers de vitrification d'AREVA/La Hague (COG-850)

Dans les premières années d'exploitation de l'atelier de vitrification R7 de La Hague, des déchets technologiques d'exploitation de cet atelier ont été conditionnés dans des conteneurs standards en acier inoxydable de géométrie extérieure identique à celle des colis de déchets vitrifiés de La Hague. Ce même conditionnement est envisagé pour des paniers contenant des déchets technologiques tels que des morceaux de verre et des découpes d'équipements des ateliers R7 et T7.

Déchets issus des colonnes d'élution d'ELAN IIB conditionnés en conteneurs standard d'AREVA/La Hague (COG-860)

L'atelier Elan IIB, situé à La Hague, était un pilote pour la fabrication de sources scellées de césium 137 et de strontium 90. Le césium était transporté depuis le CEA/Marcoule dans des colonnes d'élution sur un échangeur minéral puis élué, concentré et calciné. La poudre d'oxyde de césium était ensuite frittée et conditionnée sous une double enveloppe métallique. Quatre colonnes d'élution sont actuellement entreposées à La Hague. Le procédé de conditionnement de l'échangeur minéral de ces colonnes d'élution n'est pas arrêté. A ce stade, un conditionnement en conteneur standard en acier inoxydable est retenu.

Colis de capsules de titanate de strontium d'AREVA/La Hague (COG-870)

L'atelier Elan IIB, situé à La Hague, était un pilote pour la fabrication de sources scellées de césium 137 et de strontium 90. Le strontium arrivait conditionné dans l'atelier Elan IIB dans des étuis métalliques (capsules) et subissait des opérations de fractionnement, compactage et conditionnement sous une double enveloppe métallique. Cet atelier, dont l'exploitant nucléaire était le CEA, a été mis en service en 1970. La production a été arrêtée à partir de 1973. Quinze capsules de titanate de strontium sont actuellement entreposées à La Hague. Le procédé actuellement envisagé pour le conditionnement de ces capsules consiste à les bloquer dans un conteneur standard en acier inoxydable. Le choix de la matrice de blocage est à l'étude.

Sources scellées usagées (césium 137, strontium 90, plutonium 238) du CEA (CEA-1500)

Il s'agit de sources de forte activité au césium et au strontium, dont certaines proviennent de générateurs isotopiques ainsi que d'un lot de sources de stimulateurs cardiaques (Pu 238). Ces sources seront conditionnées dans un colis de géométrie extérieure identique au colis de verre AVM.

Le tableau ci-après synthétise les familles de déchets HA ainsi que leur nombre.

Identifiant Famille	Intitulé Famille	Identifiant Edition 2012 de l'IN	Nombre de colis
CEA-200	Conteneurs RIVER produits de 1969 à 1981 contenant des solutions de produits de fission SICRAL et PHENIX dans une matrice verre	F1-5-01	88
CEA-350	Conteneurs en acier inoxydable contenant des déchets vitrifiés d'Atalante	-	5
CEA-1070	Conteneurs de déchets vitrifiés AVM produits sous spécification d'assurance qualité depuis mars 1995	F1-4-01	865
CEA-1080	Conteneurs de déchets vitrifiés AVM produits avant 1995	F1-4-01	2 294
CEA-1190	Déchets vitrifiés divers (verres de laboratoire) entreposés au bâtiment 213 de l'APM (hors RIVER)	F1-5-01	8
CEA-1500	Sources radioactives HA (137Cs, 90Sr, 238Pu)	S01	7
COC-140	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres UOX produits suivant la spécification 300 AQ 016	F1-3-01	6 900
COC-150	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-U : verres UMO produits suivant la spécification 300 AQ 059	F1-3-02	1 000
COC-200	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres UOX/URE/MOX	F1-3-01	24 060
COC-800	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres UOX produits suivant la spécification 300 AQ 060	F1-3-01	19 010
COC-810	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres de vidange R7/T7	F1-3-01	250
COC-820	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres de calcinats	F1-3-01	75
COC-830	Conteneurs Standards de Déchets Vitrifiés/CSD-V : verres REP/RNR (Superphénix et Phénix)	F1-3-01	1 095
COC-850	Déchets technologiques issus des ateliers de vitrification conditionnés en Conteneurs Standards	F1-3-03	200
COC-860	Déchets issus des colonnes d'éluion d'ELAN IIB conditionnés en Conteneurs Standards	F1-3-05	52
COC-870	Capsules de titanates de Sr conditionnées en Conteneurs Standards	F1-3-04	3
COC-880	Colis de déchets vitrifiés issus du traitement des CU du CEA/Civil	F1-3-01	11
COC-890	Colis de déchets vitrifiés issus du traitement des CU du CEA/DAM	F1-3-01	80
COC-900	Colis de déchets vitrifiés issus du traitement des CU EL4	F1-3-01	30

56 083

Annexe 3 : Inventaire radiologique de référence des familles de colis HA0, HA1 et HA2 et MA-VL.

Evolution des activités pour les radionucléides dont l'activité maximale est supérieure à 10^{12} Bq sur une période de 1 Ma après fermeture

Inventaire HA0 complet (4147 colis)															
Classement par activités maximum sur 1 Ma décroissantes n° 1 à 42 - (I0 : 2140 / Idec Inv : 2140)															
Activité 42 RN (4.4E-01 < période < 5.0E+10 ans et act. max > 1E+12 Bq) (D'après calculs Darwin Pepin avec filiation - Jeff 3.1.1.)															
[C:\Moleurs\TCI-Cigeo-v24e_do141112-reXXX-anOB-mar3-opN-sdO-fl234-v5SF3-pr12345-sv\#Moleur - AGIR-v43a_spFA-paO_TCI-Cigeo-v24e_do141112-reXXX-anOB-mar3-opN-sdO-fl234-v5SF3-pr12345-sv.xlsm]															
n°	RN	Période [ans]	Activité I0 = 2140 [Bq]	Activité I0=100a [Bq]	Activité I0+200a [Bq]	Activité à 500 a [Bq]	Activité à 1000 a [Bq]	Activité à 2000 a [Bq]	Activité à 5000 a [Bq]	Activité à 10000 a [Bq]	Activité à 20000 a [Bq]	Activité à 50000 a [Bq]	Activité à 100000 a [Bq]	Activité max sur 1Ma [Bq]	Temps du max sur 1Ma [ans]
1	Cs-137	3.00E+01	7.28E+17	7.25E+16	7.21E+15	7.11E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	7.28E+17	10
2	Sr-90	2.88E+01	4.20E+17	3.78E+16	3.41E+15	2.49E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	4.20E+17	10
3	Am-241	4.33E+02	9.80E+16	8.35E+16	7.12E+16	4.40E+16	1.98E+16	3.98E+15	3.30E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	9.80E+16	10
4	Sm-151	9.00E+01	7.15E+16	3.31E+16	1.53E+16	1.52E+15	3.23E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	7.15E+16	10
5	Tc-99	2.14E+05	3.37E+15	3.36E+15	3.36E+15	3.36E+15	3.35E+15	3.34E+15	3.31E+15	3.26E+15	3.15E+15	2.86E+15	2.43E+15	3.37E+15	10
6	Pu-238	8.77E+01	1.39E+15	7.16E+14	3.76E+14	6.19E+13	4.20E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.39E+15	10
7	Pu-239	2.41E+04	5.14E+14	5.13E+14	5.12E+14	5.10E+14	5.06E+14	4.97E+14	4.70E+14	4.23E+14	3.32E+14	1.46E+14	3.49E+13	5.14E+14	1.00E-01
8	Pu-240	6.56E+03	4.79E+14	4.74E+14	4.69E+14	4.54E+14	4.31E+14	3.88E+14	2.83E+14	1.67E+14	5.79E+13	2.44E+12	< 1.E+12	4.79E+14	2.00E-02
9	Nb-93m	1.61E+01	4.78E+14	4.78E+14	4.77E+14	4.74E+14	4.70E+14	4.62E+14	4.46E+14	4.31E+14	4.22E+14	4.14E+14	4.05E+14	4.78E+14	3.00E+01
10	Zr-93	1.53E+06	4.35E+14	4.35E+14	4.35E+14	4.34E+14	4.34E+14	4.34E+14	4.34E+14	4.33E+14	4.31E+14	4.25E+14	4.15E+14	4.35E+14	10
11	Np-237	2.14E+06	2.33E+14	2.36E+14	2.39E+14	2.44E+14	2.49E+14	2.52E+14	2.53E+14	2.52E+14	2.52E+14	2.49E+14	2.45E+14	2.53E+14	4.00E+03
12	Am-242m	1.41E+02	2.39E+14	1.46E+14	8.96E+13	2.05E+13	1.75E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.39E+14	10
13	Am-243	7.36E+03	2.38E+14	2.36E+14	2.33E+14	2.27E+14	2.16E+14	1.97E+14	1.49E+14	9.28E+13	3.62E+13	2.15E+12	< 1.E+12	2.38E+14	5.00E-02
14	Th-229	7.34E+03	2.21E+14	2.20E+14	2.20E+14	2.19E+14	2.17E+14	2.14E+14	2.07E+14	1.99E+14	1.93E+14	1.95E+14	2.05E+14	2.25E+14	4.00E+05
15	U-233	1.59E+05	1.84E+14	1.84E+14	1.84E+14	1.84E+14	1.84E+14	1.85E+14	1.85E+14	1.87E+14	1.90E+14	1.97E+14	2.07E+14	2.25E+14	4.00E+05
16	Ni-63	1.01E+02	2.12E+14	1.06E+14	5.34E+13	6.76E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.12E+14	10
17	Cm-242	4.46E-01	1.99E+14	1.22E+14	7.44E+13	1.70E+13	1.46E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.99E+14	10
18	Th-230	7.54E+04	1.96E+14	1.96E+14	1.96E+14	1.96E+14	1.96E+14	1.96E+14	1.95E+14	1.95E+14	1.93E+14	1.86E+14	1.72E+14	1.96E+14	5.00E-01
19	Ra-226	1.60E+03	1.82E+14	1.83E+14	1.83E+14	1.85E+14	1.87E+14	1.90E+14	1.94E+14	1.95E+14	1.93E+14	1.87E+14	1.73E+14	1.95E+14	8.00E+03
20	Pb-210	2.22E+01	1.82E+14	1.83E+14	1.83E+14	1.85E+14	1.87E+14	1.90E+14	1.94E+14	1.95E+14	1.93E+14	1.87E+14	1.73E+14	1.95E+14	8.00E+03
21	U-234	2.46E+05	1.83E+14	1.83E+14	1.83E+14	1.83E+14	1.83E+14	1.82E+14	1.81E+14	1.78E+14	1.73E+14	1.59E+14	1.38E+14	1.83E+14	3.00E+02
22	Cm-244	1.80E+01	1.72E+14	3.66E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.72E+14	10
23	Cs-135	2.30E+06	1.67E+14	1.67E+14	1.67E+14	1.67E+14	1.67E+14	1.67E+14	1.67E+14	1.67E+14	1.66E+14	1.65E+14	1.62E+14	1.67E+14	10
24	Sn-126	2.30E+05	1.26E+14	1.26E+14	1.26E+14	1.26E+14	1.26E+14	1.26E+14	1.24E+14	1.23E+14	1.19E+14	1.09E+14	9.35E+13	1.26E+14	10
25	Se-79	3.77E+05	7.80E+13	7.80E+13	7.80E+13	7.79E+13	7.78E+13	7.77E+13	7.73E+13	7.66E+13	7.52E+13	7.11E+13	6.49E+13	7.80E+13	10
26	Mo-93	4.00E+03	6.23E+13	6.12E+13	6.01E+13	5.71E+13	5.23E+13	4.40E+13	2.62E+13	1.10E+13	1.95E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.23E+13	10
27	Pu-241	1.43E+01	3.88E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	3.88E+13	10
28	Cm-243	3.00E+01	1.82E+13	1.81E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.82E+13	10
29	Pd-107	6.50E+06	1.59E+13	1.59E+13	1.59E+13	1.59E+13	1.59E+13	1.59E+13	1.59E+13	1.59E+13	1.59E+13	1.58E+13	1.58E+13	1.59E+13	10
30	U-236	2.37E+07	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.31E+13	1.31E+13	1.31E+13	1.31E+13	1.31E+13	1.31E+13	3.00E+04
31	Th-228	1.91E+00	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.25E+01
32	Th-232	1.41E+10	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.00E+05
33	Ra-228	5.75E+00	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.30E+13	1.00E+05
34	Nb-91	6.80E+02	9.08E+12	8.20E+12	7.41E+12	5.46E+12	3.28E+12	1.18E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	9.08E+12	10
35	Ni-59	7.60E+04	4.61E+12	4.61E+12	4.60E+12	4.59E+12	4.57E+12	4.53E+12	4.41E+12	4.21E+12	3.84E+12	2.92E+12	1.85E+12	4.61E+12	10
36	Eu-152	1.35E+01	4.61E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	4.61E+12	10
37	U-235	7.04E+08	3.78E+12	3.78E+12	3.78E+12	3.78E+12	3.78E+12	3.78E+12	3.78E+12	3.79E+12	3.79E+12	3.80E+12	3.80E+12	3.80E+12	2.00E+05
38	Ac-227	2.18E+01	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.78E+12	3.79E+12	3.80E+12	3.00E+05
39	Pa-231	3.28E+04	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.77E+12	3.78E+12	3.79E+12	3.80E+12	3.00E+05
40	Cd-113m	1.41E+01	3.25E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	3.25E+12	10
41	Eu-154	8.59E+00	2.99E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.99E+12	10
42	Sn-121m	5.50E+01	1.94E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.94E+12	10
*	Code couleurs. Valeur minimale : 1.00E+12 Bq							Valeur maximale : 7.28E+17 Bq							









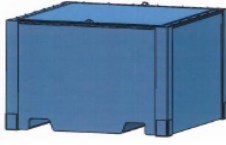


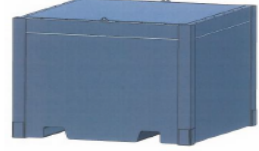

Inventaire HA1 HA2 complet (51886 colis)															
Classement par activités maximum sur 1 Ma décroissantes n° 1 à 53 - (I0 : 2140 / Idec Inv: 2140)															
Activité 53 RN (4.4E-01 < période < 5.0E+10 ans et act. max > 1E+12 Bq) (D'après calculs Darwin Pepin avec filiation - Jeff 3.1.1.)															
IC:\Molécules\TCI-Cigéo-v24e_d0141112-reXXX-anOB-marR3-opN-sdO-fl234-v5SF3-pr12345-sv\Moleur - AGIR-v43a_spFA-paO_TCI-Cigéo-v24e_d0141112-reXXX-anOB-marR3-opN-sdO-fl234-v5SF3-pr12345-sv.xlsm															
n°	RN	Période [ans]	Activité I0 = 2140 [Bq]	Activité I0=100a [Bq]	Activité I0+200a [Bq]	Activité à 500 a [Bq]	Activité à 1000 a [Bq]	Activité à 2000 a [Bq]	Activité à 5000 a [Bq]	Activité à 10000 a [Bq]	Activité à 20000 a [Bq]	Activité à 50000 a [Bq]	Activité à 100000 a [Bq]	Activité max sur 1Ma [Bq]	Temps du max sur 1Ma [ans]
1	Cs-137	3.00E+01	6.19E+19	6.16E+18	6.13E+17	6.05E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.19E+19	10
2	Sr-90	2.88E+01	3.59E+19	3.24E+18	2.91E+17	2.13E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	3.59E+19	10
3	Am-241	4.33E+02	1.62E+19	1.38E+19	1.18E+19	7.30E+18	3.28E+18	6.70E+17	1.31E+16	5.10E+15	2.26E+15	1.95E+14	3.31E+12	1.62E+19	10
4	Sm-151	9.00E+01	1.06E+18	4.90E+17	2.27E+17	2.25E+16	4.79E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.06E+18	10
5	Cm-244	1.80E+01	9.84E+17	2.09E+16	4.45E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	9.84E+17	10
6	Am-243	7.36E+03	3.37E+17	3.34E+17	3.31E+17	3.21E+17	3.07E+17	2.79E+17	2.10E+17	1.31E+17	5.13E+16	3.05E+15	2.76E+13	3.37E+17	5.00E-02
7	Pu-240	6.56E+03	1.24E+17	1.26E+17	1.24E+17	1.20E+17	1.14E+17	1.03E+17	7.48E+16	4.41E+16	1.54E+16	6.46E+14	3.29E+12	1.26E+17	5.00E+01
8	Tc-99	2.14E+05	9.46E+16	9.46E+16	9.46E+16	9.45E+16	9.43E+16	9.40E+16	9.31E+16	9.16E+16	8.87E+16	8.05E+16	6.85E+16	9.46E+16	10
9	Pu-238	8.77E+01	6.92E+16	3.82E+16	2.15E+16	4.17E+15	3.23E+14	2.30E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.92E+16	10
10	Pu-239	2.41E+04	7.96E+15	8.94E+15	9.87E+15	1.26E+16	1.69E+16	2.47E+16	4.27E+16	5.93E+16	6.53E+16	3.58E+16	8.80E+15	6.53E+16	1.50E+04
11	Ni-63	1.01E+02	5.45E+16	2.74E+16	1.37E+16	1.74E+15	5.55E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	5.45E+16	10
12	Pu-241	1.43E+01	3.11E+16	1.10E+16	1.08E+16	1.05E+16	1.01E+16	9.29E+15	7.28E+15	4.84E+15	2.14E+15	1.85E+14	3.14E+12	3.11E+16	10
13	Cm-243	3.00E+01	2.94E+16	2.92E+15	2.90E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.94E+16	10
14	Am-242m	1.41E+02	1.94E+16	1.18E+16	7.24E+15	1.66E+15	1.42E+14	1.04E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.94E+16	10
15	Cm-242	4.46E+01	1.61E+16	9.84E+15	6.02E+15	1.38E+15	1.18E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.61E+16	10
16	Zr-93	1.53E+06	1.22E+16	1.22E+16	1.22E+16	1.22E+16	1.22E+16	1.22E+16	1.22E+16	1.21E+16	1.21E+16	1.19E+16	1.16E+16	1.22E+16	10
17	Nb-93m	1.61E+01	1.19E+16	1.21E+16	1.21E+16	1.21E+16	1.21E+16	1.20E+16	1.19E+16	1.19E+16	1.18E+16	1.16E+16	1.13E+16	1.21E+16	1.25E+02
18	Eu-154	8.59E+00	1.18E+16	3.70E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.18E+16	10
19	Cm-245	8.50E+03	1.09E+16	1.08E+16	1.07E+16	1.05E+16	1.01E+16	9.28E+15	7.26E+15	4.83E+15	2.14E+15	1.85E+14	3.14E+12	1.09E+16	5.00E-02
20	Np-237	2.14E+06	3.85E+15	4.34E+15	4.75E+15	5.66E+15	6.48E+15	7.00E+15	7.14E+15	7.14E+15	7.13E+15	7.07E+15	6.95E+15	7.14E+15	6.00E+03
21	Sn-121m	5.50E+01	6.11E+15	1.73E+15	4.92E+14	1.12E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.11E+15	10
22	U-233	1.59E+05	1.53E+12	3.31E+12	5.29E+12	1.21E+13	2.54E+13	5.49E+13	1.46E+14	2.97E+14	5.88E+14	1.38E+15	2.48E+15	6.82E+15	6.00E+05
23	Th-229	7.34E+03	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.16E+12	4.68E+12	2.89E+13	1.04E+14	3.25E+14	1.11E+15	2.27E+15	5.81E+15	6.00E+05
24	Cs-135	2.30E+06	3.53E+15	3.53E+15	3.53E+15	3.53E+15	3.53E+15	3.53E+15	3.52E+15	3.52E+15	3.51E+15	3.48E+15	3.42E+15	3.53E+15	10
25	Sn-126	2.30E+05	3.37E+15	3.37E+15	3.37E+15	3.36E+15	3.36E+15	3.35E+15	3.32E+15	3.27E+15	3.17E+15	2.90E+15	2.49E+15	3.37E+15	10
26	Cm-246	4.73E+03	2.38E+15	2.34E+15	2.31E+15	2.21E+15	2.05E+15	1.77E+15	1.14E+15	5.49E+14	1.27E+14	1.56E+12	< 1.E+12	2.38E+15	2.00E-02
27	Se-79	3.77E+05	1.28E+15	1.28E+15	1.28E+15	1.28E+15	1.28E+15	1.28E+15	1.27E+15	1.26E+15	1.24E+15	1.17E+15	1.07E+15	1.28E+15	10
28	Nb-94	2.00E+04	1.18E+15	1.18E+15	1.17E+15	1.16E+15	1.14E+15	1.10E+15	9.92E+14	8.34E+14	5.89E+14	2.08E+14	3.68E+13	1.18E+15	10
29	Cd-113m	1.41E+01	1.02E+15	7.50E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.02E+15	10
30	Pd-107	6.50E+06	1.01E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.00E+15	9.97E+14	1.01E+15	10
31	Ni-59	7.60E+04	9.16E+14	9.15E+14	9.14E+14	9.12E+14	9.08E+14	8.99E+14	8.75E+14	8.36E+14	7.63E+14	5.80E+14	3.68E+14	9.16E+14	10
32	C-14	5.70E+03	3.41E+14	3.37E+14	3.32E+14	3.21E+14	3.02E+14	2.67E+14	1.85E+14	1.01E+14	2.99E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	3.41E+14	10
33	Eu-152	1.35E+01	2.86E+14	1.70E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.86E+14	10
34	Mo-93	4.00E+03	2.75E+14	2.70E+14	2.66E+14	2.52E+14	2.31E+14	1.94E+14	1.16E+14	4.86E+13	8.59E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.75E+14	10
35	H-3	1.23E+01	2.63E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.63E+14	10
36	Cl-36	3.01E+05	1.72E+14	1.72E+14	1.72E+14	1.72E+14	1.72E+14	1.71E+14	1.70E+14	1.68E+14	1.64E+14	1.53E+14	1.37E+14	1.72E+14	10
37	Pu-242	3.74E+05	7.99E+13	8.08E+13	8.15E+13	8.31E+13	8.51E+13	8.85E+13	9.60E+13	1.03E+14	1.06E+14	1.02E+14	9.27E+13	1.06E+14	2.00E+04
38	Ca-41	1.03E+05	7.25E+13	7.24E+13	7.24E+13	7.22E+13	7.20E+13	7.15E+13	7.01E+13	6.78E+13	6.33E+13	5.18E+13	3.70E+13	7.25E+13	10
39	U-234	2.46E+05	3.31E+13	4.78E+13	5.60E+13	6.48E+13	6.68E+13	6.68E+13	6.62E+13	6.54E+13	6.36E+13	5.86E+13	5.12E+13	6.69E+13	1.25E+03
40	Ho-166m	1.20E+03	4.43E+13	4.18E+13	3.94E+13	3.32E+13	2.48E+13	1.39E+13	2.46E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	4.43E+13	10
41	Pb-210	2.22E+01	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.30E+12	5.08E+12	1.03E+13	2.26E+13	3.45E+13	4.04E+13	2.00E+05
42	Ra-226	1.60E+03	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.31E+12	5.10E+12	1.03E+13	2.26E+13	3.45E+13	4.04E+13	2.00E+05
43	Th-230	7.54E+04	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.22E+12	1.82E+12	3.58E+12	6.37E+12	1.15E+13	2.34E+13	3.49E+13	4.04E+13	2.00E+05
44	U-236	2.37E+07	2.73E+12	3.09E+12	3.46E+12	4.53E+12	6.25E+12	9.42E+12	1.71E+13	2.56E+13	3.36E+13	3.76E+13	3.78E+13	3.78E+13	8.00E+04
45	Ag-108m	4.18E+02	1.02E+13	8.65E+12	7.33E+12	4.46E+12	1.95E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.02E+13	10
46	Eu-155	4.75E+00	7.26E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	7.26E+12	10
47	Kr-85	1.08E+01	6.36E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.36E+12	10
48	Co-60	5.27E+00	4.69E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	4.69E+12	10
49	U-235	7.04E+08	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.14E+12	2.65E+12	3.61E+12	4.00E+05
50	Ac-227	2.18E+01	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.11E+12	2.55E+12	3.91E+12	5.00E+05
51	Pa-231	3.28E+04	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.11E+12	2.55E+12	3.91E+12	5.00E+05
52	U-238	4.47E+09	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.23E+12	2.23E+12	1.00E+06
53	I-129	1.61E+07	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	2.15E+12	10
*	Code couleurs. Valeur minimale : 1.00E+12 Bq								Valeur maximale : 6.19E+19 Bq						

Inventaire MAVL complet (175981 colis)															
Classement par activités maximum sur 1 Ma décroissantes n° 1 à 62 - (I0 : 2140 / Idec Inv: 2140)															
Activité 62 RN (4.4E-01 < période < 5.0E+10 ans et act. max > 1E+12 Bq) (D'après calculs Darwin Pepin avec filiation - Jeff 3.1.1.)															
[C:\Molours\TCI-Cigeo-v24e_d0141112-reXXX-anOB-marR3-opN-sdO-f1234-v5SF3-pr12345-sv#Moleur - AGIR-v43a_spFA-paO_TCI-Cigeo-v24e_d0141112-reXXX-anOB-marR3-opN-sdO-f1234-v5SF3-pr12345-sv.xlsml]															
n°	RN	Période [ans]	Activité I0 = 2140 [Bq]	Activité I0=100a [Bq]	Activité I0+200a [Bq]	Activité à 500 a [Bq]	Activité à 1000 a [Bq]	Activité à 2000 a [Bq]	Activité à 5000 a [Bq]	Activité à 10000 a [Bq]	Activité à 20000 a [Bq]	Activité à 50000 a [Bq]	Activité à 100000 a [Bq]	Activité max sur 1Ma [Bq]	Temps du max sur 1Ma [ans]
1	Ni-63	1.01E+02	6.94E+18	3.49E+18	1.75E+18	2.22E+17	7.07E+15	7.19E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.94E+18	10
2	Cs-137	3.00E+01	1.03E+18	1.02E+17	1.02E+16	1.00E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.03E+18	10
3	Am-241	4.33E+02	3.29E+17	2.81E+17	2.39E+17	1.48E+17	6.65E+16	1.34E+16	1.14E+14	2.75E+12	1.20E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	3.29E+17	10
4	Sr-90	2.88E+01	2.40E+17	2.16E+16	1.95E+15	1.42E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.40E+17	10
5	Pu-238	8.77E+01	9.26E+16	4.20E+16	1.91E+16	1.78E+15	3.47E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	9.26E+16	10
6	Ni-59	7.60E+04	7.50E+16	7.49E+16	7.49E+16	7.47E+16	7.43E+16	7.37E+16	7.17E+16	6.85E+16	6.25E+16	4.75E+16	3.01E+16	7.50E+16	10
7	Pu-240	6.56E+03	3.77E+16	3.74E+16	3.70E+16	3.58E+16	3.40E+16	3.06E+16	2.23E+16	1.31E+16	4.57E+15	1.92E+14	1.08E+12	3.77E+16	2.00E-02
8	Pu-239	2.41E+04	3.49E+16	3.48E+16	3.47E+16	3.44E+16	3.40E+16	3.30E+16	3.03E+16	2.63E+16	1.97E+16	8.35E+15	1.98E+15	3.49E+16	1.00E-01
9	C-14	5.70E+03	3.49E+16	3.45E+16	3.41E+16	3.29E+16	3.09E+16	2.74E+16	1.90E+16	1.04E+16	3.07E+15	7.99E+13	< 1.E+12	3.49E+16	10
10	Nb-94	2.00E+04	3.11E+16	3.10E+16	3.09E+16	3.06E+16	3.00E+16	2.90E+16	2.61E+16	2.20E+16	1.55E+16	5.49E+15	9.69E+14	3.11E+16	10
11	Pu-241	1.43E+01	2.59E+16	2.11E+14	7.35E+12	5.58E+12	5.36E+12	4.94E+12	3.87E+12	2.57E+12	1.14E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.59E+16	10
12	H-3	1.23E+01	1.86E+16	6.73E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.86E+16	10
13	Sm-151	9.00E+01	5.84E+15	2.70E+15	1.25E+15	1.24E+14	2.64E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	5.84E+15	10
14	Ra-226	1.60E+03	5.70E+15	5.50E+15	5.31E+15	4.79E+15	4.05E+15	2.98E+15	1.54E+15	1.07E+15	1.02E+15	1.02E+15	9.85E+14	5.70E+15	1.00E-02
15	Pb-210	2.22E+01	5.70E+15	5.56E+15	5.37E+15	4.84E+15	4.09E+15	3.01E+15	1.55E+15	1.07E+15	1.02E+15	1.02E+15	9.85E+14	5.70E+15	10
16	Tc-99	2.14E+05	4.97E+15	4.97E+15	4.97E+15	4.96E+15	4.96E+15	4.94E+15	4.89E+15	4.81E+15	4.66E+15	4.23E+15	3.60E+15	4.97E+15	10
17	Nb-93m	1.61E+01	2.68E+15	2.70E+15	2.68E+15	2.61E+15	2.52E+15	2.35E+15	1.98E+15	1.67E+15	1.48E+15	1.42E+15	1.39E+15	2.71E+15	5.00E+01
18	Ag-108m	4.18E+02	2.32E+15	1.96E+15	1.66E+15	1.01E+15	4.41E+14	8.41E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.32E+15	10
19	Zr-93	1.53E+06	1.49E+15	1.49E+15	1.49E+15	1.49E+15	1.49E+15	1.49E+15	1.48E+15	1.48E+15	1.47E+15	1.45E+15	1.42E+15	1.49E+15	10
20	Mo-93	4.00E+03	1.44E+15	1.41E+15	1.39E+15	1.32E+15	1.21E+15	1.02E+15	6.05E+14	2.54E+14	4.50E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	1.44E+15	10
21	Pd-107	6.50E+06	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.18E+15	1.18E+15	1.19E+15	10
22	Np-237	2.14E+06	1.06E+15	1.07E+15	1.08E+15	1.10E+15	1.12E+15	1.13E+15	1.13E+15	1.13E+15	1.12E+15	1.11E+15	1.09E+15	1.13E+15	4.00E+03
23	U-234	2.46E+05	1.09E+15	1.11E+15	1.12E+15	1.12E+15	1.12E+15	1.12E+15	1.11E+15	1.10E+15	1.07E+15	9.88E+14	8.67E+14	1.12E+15	6.00E+02
24	U-233	1.59E+05	1.06E+15	1.06E+15	1.06E+15	1.06E+15	1.06E+15	1.06E+15	1.06E+15	1.06E+15	1.07E+15	1.07E+15	1.08E+15	1.08E+15	1.50E+05
25	Th-229	7.34E+03	1.03E+15	1.03E+15	1.03E+15	1.03E+15	1.03E+15	1.04E+15	1.04E+15	1.05E+15	1.06E+15	1.07E+15	1.08E+15	1.08E+15	1.50E+05
26	Th-230	7.54E+04	1.00E+15	1.00E+15	1.00E+15	1.00E+15	1.00E+15	1.00E+15	1.01E+15	1.01E+15	1.02E+15	1.02E+15	9.83E+14	1.02E+15	4.00E+04
27	Co-60	5.27E+00	9.17E+14	4.38E+14	4.38E+14	4.38E+14	4.38E+14	4.38E+14	4.37E+14	4.36E+14	4.34E+14	4.18E+14	4.18E+14	9.17E+14	10
28	Cm-244	1.80E+01	7.57E+14	1.61E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	7.57E+14	10
29	Sn-121m	5.50E+01	6.16E+14	1.75E+14	4.95E+13	1.13E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.16E+14	10
30	Am-243	7.36E+03	4.99E+14	4.94E+14	4.90E+14	4.76E+14	4.54E+14	4.13E+14	3.12E+14	1.95E+14	7.60E+13	4.54E+12	< 1.E+12	4.99E+14	5.00E-02
31	Fe-60	1.50E+06	4.39E+14	4.39E+14	4.39E+14	4.39E+14	4.39E+14	4.39E+14	4.38E+14	4.37E+14	4.35E+14	4.29E+14	4.20E+14	4.39E+14	10
32	Nb-91	6.80E+02	3.36E+14	3.03E+14	2.74E+14	2.02E+14	1.21E+14	4.37E+13	2.06E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	3.36E+14	10
33	Be-10	1.60E+06	2.89E+14	2.89E+14	2.89E+14	2.89E+14	2.89E+14	2.89E+14	2.88E+14	2.88E+14	2.86E+14	2.83E+14	2.77E+14	2.89E+14	10
34	Kr-85	1.08E+01	2.62E+14	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.62E+14	10
35	Pu-242	3.74E+05	1.68E+14	1.68E+14	1.68E+14	1.68E+14	1.68E+14	1.67E+14	1.66E+14	1.65E+14	1.62E+14	1.53E+14	1.39E+14	1.68E+14	2.50E+00
36	U-236	2.37E+07	7.31E+13	7.32E+13	7.33E+13	7.37E+13	7.42E+13	7.51E+13	7.74E+13	7.99E+13	8.23E+13	8.34E+13	8.33E+13	8.34E+13	6.00E+04
37	Cm-243	3.00E+01	8.31E+13	8.25E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	8.31E+13	10
38	Cl-36	3.01E+05	8.25E+13	8.24E+13	8.24E+13	8.24E+13	8.23E+13	8.21E+13	8.15E+13	8.06E+13	7.87E+13	7.35E+13	6.55E+13	8.25E+13	10
39	Sn-126	2.30E+05	7.50E+13	7.50E+13	7.49E+13	7.49E+13	7.47E+13	7.45E+13	7.39E+13	7.27E+13	7.06E+13	6.45E+13	5.55E+13	7.50E+13	10
40	U-238	4.47E+09	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	7.19E+13	4.00E+05
41	Th-228	1.91E+00	7.13E+13	7.12E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.13E+13	3.00E+00
42	Th-232	1.41E+10	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	5.00E+05
43	Ra-228	5.75E+00	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	7.11E+13	5.00E+05
44	Pt-193	5.00E+01	6.70E+13	1.67E+13	4.18E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.70E+13	10
45	Eu-154	8.59E+00	6.46E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	6.46E+13	10
46	U-235	7.04E+08	4.23E+13	4.23E+13	4.23E+13	4.24E+13	4.24E+13	4.24E+13	4.25E+13	4.26E+13	4.29E+13	4.33E+13	4.35E+13	4.35E+13	2.50E+05
47	Ac-227	2.18E+01	3.11E+13	3.12E+13	3.12E+13	3.12E+13	3.14E+13	3.16E+13	3.23E+13	3.33E+13	3.51E+13	3.89E+13	4.18E+13	4.35E+13	4.00E+05
48	Pa-231	3.28E+04	3.11E+13	3.12E+13	3.12E+13	3.13E+13	3.14E+13	3.16E+13	3.23E+13	3.33E+13	3.51E+13	3.89E+13	4.18E+13	4.35E+13	4.00E+05
49	Se-79	3.77E+05	3.94E+13	3.94E+13	3.94E+13	3.94E+13	3.94E+13	3.93E+13	3.91E+13	3.91E+13	3.80E+13	3.60E+13	3.28E+13	3.94E+13	10



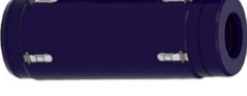



* Code couleurs. Valeur minimale : 1.00E+12 Bq Valeur maximale : 6.94E+18 Bq

Inventaire MAVL complet (175981 colis)																
Classement par activités maximum sur 1 Ma décroissantes n° 1 à 62 - (I0 : 2140 / Idec Inv : 2140)																
Activité 62 RN (4.4E-01 < période < 5.0E+10 ans et act. max > 1E+12 Bq) (D'après calculs Darwin Pepin avec filiation - Jeff 3.1.1.)																
[C:\Moleurs\TCI-Cigéo-v24e_do141112-reXXX-anOB-maR3-opN-sdO-fl234-v5SF3-pr12345-sv\#Moleur - AGIR-v43a_spFA-paO_TCI-Cigéo-v24e_do141112-reXXX-anOB-maR3-opN-sdO-fl234-v5SF3-pr12345-sv.xlsml]																
n°	RN	Période [ans]	Activité I0 = 2140 [Bq]	Activité I0=100a [Bq]	Activité I0+200a [Bq]	Activité à 500 a [Bq]	Activité à 1000 a [Bq]	Activité à 2000 a [Bq]	Activité à 5000 a [Bq]	Activité à 10000 a [Bq]	Activité à 20000 a [Bq]	Activité à 50000 a [Bq]	Activité à 100000 a [Bq]	Activité max sur 1Ma [Bq]	Temps du max sur 1Ma [ans]	
50	Ar-39	2.69E+02	3.18E+13	2.46E+13	1.90E+13	8.77E+12	2.42E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	3.18E+13	10	
51	Am-242m	1.41E+02	2.89E+13	1.77E+13	1.08E+13	2.47E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.89E+13	10	
52	Cs-135	2.30E+06	2.44E+13	2.44E+13	2.44E+13	2.44E+13	2.44E+13	2.44E+13	2.43E+13	2.43E+13	2.42E+13	2.40E+13	2.37E+13	2.44E+13	10	
53	Cm-242	4.46E-01	2.39E+13	1.47E+13	8.98E+12	2.05E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.39E+13	10	
54	Nb-92	3.50E+07	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	1.52E+13	10	
55	Cd-113m	1.41E+01	1.24E+13	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.24E+13	10	
56	Ca-41	1.03E+05	9.30E+12	9.29E+12	9.29E+12	9.27E+12	9.24E+12	9.18E+12	8.99E+12	8.69E+12	8.13E+12	6.64E+12	4.74E+12	9.30E+12	10	
57	Cm-245	8.50E+03	5.81E+12	5.76E+12	5.71E+12	5.58E+12	5.35E+12	4.93E+12	3.86E+12	2.57E+12	1.14E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	5.81E+12	5.00E-02	
58	Sm-146	1.00E+08	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	4.31E+12	6.00E+02	
59	Gd-150	1.82E+06	3.43E+12	3.43E+12	3.43E+12	3.43E+12	3.43E+12	3.42E+12	3.42E+12	3.41E+12	3.40E+12	3.36E+12	3.30E+12	3.43E+12	1.25E+01	
60	Eu-152	1.35E+01	2.34E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	2.34E+12	10	
61	I-129	1.61E+07	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.89E+12	1.90E+12	10	
62	Cm-246	4.73E+03	1.58E+12	1.56E+12	1.54E+12	1.47E+12	1.37E+12	1.18E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	< 1.E+12	1.58E+12	2.00E-02	
*	Code couleurs. Valeur minimale : 1.00E+12 Bq			Valeur maximale : 6.94E+18 Bq												

Annexe 4 : Modèles de colis de stockage MA-VL au stade de l'APS

<p>CS 1</p>  <p>2250 x 1280 x 1620</p> <p>8 093 kg (vide) 13 235 kg (chargé)</p> <p>CEA-070 500 L béton CEA-140 500 L béton CEA-150 500 L béton CEA-232 EIP CEA-1040 EIP CEA-1140 EIP CEA-1050 EIP CEA-1050 EIP CEA-1151 EIP</p>	<p>CS 2.1</p>  <p>1540 x 1540 x 2035</p> <p>8 333 kg (vide) 12 353 kg (chargé)</p> <p>COG-330 CBF-C2 COG-050 CAC COG-510 CBF-C2 COG-520 CBF-C2 COG-480 CBF-C2 COG-500 CBF-C2</p>	<p>CS 3</p>  <p>1540 x 1540 x 2330</p> <p>8 302 kg (vide) 12 783 kg (chargé)</p> <p>COG-040 Fût acier 1150 L COG-440 Fût acier 1150 L</p>
<p>CS 5.1</p>  <p>1780 x 1780 x 2035</p> <p>12 667 kg (vide) 16 067 kg (chargé)</p> <p>CEA-050 870 L 313 CEA-050 870 L 313 FI EXT CEA-080 870 L 0-Pu CEA-090 870 L 313 FI AND-000 870 L vrac CEA-270 870 L 313 FI CEA-330 870 L 313 FI CEA-1510 870 L 313 FI CEA-1100 870 L 313 FI</p>	<p>CS 2.2</p>  <p>1540 x 1540 x 2035</p> <p>9 380 kg (vide) 12 638 kg (chargé)</p> <p>COG-100 CSD-C COG-110 CSD-C COG-530 CSD-C COG-540 CSD-C COG-550 CSD-C CEA-340 CSD-C COG-470 CSD-B COG-070 CSD-C COG-120 CSD-C COG-450 CSD-C COG-460 CSD-C COG-490 CSD-C</p>	<p>CS 4</p>  <p>2020 x 2020 x 1650</p> <p>11 275 kg (vide) 14 650 kg (chargé)</p> <p>CEA-320 Fût acier inoxydable de 200 L CEA-320 Fût acier noir de 200 L CEA-280 223 L CEA-1060 223 L COG-020 Fût acier 215 L « Modèle à fond soudé » COG-020 Fût acier 215 L « Modèle à fond serti » COG-420 Fût acier 215 L « Modèle à fond soudé » CEA-1000 Sur-fût EIP CEA-1010 Sur-fût EIP CEA-1020 Sur-fût EIP CEA-1021 Sur-fût EIP CEA-1180 223 L CEA-430 223 L</p>
<p>CS 5.2</p>  <p>1780 x 1780 x 2035</p> <p>11 103 kg (vide) 16 089 kg (chargé)</p> <p>CEA-100 870 L FAH CEA-100 700 L CEA-310 1000 L</p>	<p>CS 2.3</p>  <p>1540 x 1540 x 2035</p> <p>8 371 kg (vide) 12 700 kg (chargé)</p> <p>CEA-060 Inox 405 L utiles « 500 L Ml » CEA-060 acier noir et inox 370 L utiles « 500 L Ml » CEA-110 acier noir 370 L utiles « 500 L Ml » CEA-440 Inox 405 L utiles « 500 L Ml » CEA-120 acier noir 370 L utiles « 500 L Ml »</p>	<p>CS 6</p>  <p>2046 x 2046 x 1836</p> <p>1 336 kg (vide) 16 796 kg (chargé)</p> <p>CEA-290 2405 L CEA-290 1930 L CEA-300 1930 L CEA-450 Conteneur acier 2979 L</p>
<p>CS 5.3</p>  <p>1780 x 1780 x 2035</p> <p>20 021 kg (vide) 17 031 kg (chargé)</p> <p>EDF-080 CIPG EDF-090 CIPG</p>	<p>CS 2.4</p>  <p>1540 x 1540 x 2035</p> <p>9 254 kg (vide) 13 354 kg (chargé)</p> <p>CEA-1110 150 L « Déchets technologiques AVM (CDT) » CEA-1120 150 L « Déchets vitriques AVM »</p>	<p>CS 7</p>  <p>2246 x 2246 x 2016</p> <p>1 300 kg (vide) 13 760 kg (chargé)</p> <p>CEA-231 5000 L</p>
<p>CS 5.4</p>  <p>1780 x 1780 x 2035</p> <p>12 315 kg (vide) 16 381 kg (chargé)</p> <p>COG-430 CS</p>		

Annexe 5 : Modèles de colis de stockage HA au stade de l'APS

<p>CS R7/T7 Chaud CS 14</p> <p>Longueur : 1388 mm Diamètre : 570 mm Épaisseur vitrole : 65 mm Masse : 1900 kg</p>  <p>COG-140 CSD-V COG-150 CSD-U</p> <p>COG-200 CSD-V COG-800 CSD-V</p> <p>COG-810 CSD-V COG-820 CSD-V COG-830 CSD-V</p> <p>COG-880 CSD-V COG-890 CSD-V COG-900 CSD-V</p> <p>COG-850 Déchet technologique</p> <p>COG-860 Déchet issu d'élément d'ELAN RB</p> <p>COG-870 Capsules de titanate</p>	<p>CS AVM CS 11</p> <p>Longueur : 2277 mm Diamètre : 635 mm Épaisseur vitrole : 65 mm Masse : 3164 kg</p>  <p>CEA-350 Déchet vitifié AVM CEA-1070 Déchet vitifié AVM</p> <p>CEA-1080 Déchet vitifié AVM CEA-1500 Déchet technologique AVM</p>	<p>CS Piver type I CS 10-1</p> <p>Longueur : 1446 mm Diamètre : 570 mm Épaisseur vitrole : 65 mm Masse : 1884 kg</p>  <p>CEA-1190 Piver Type I CEA-200 Piver Type I</p>	
	<p>CS R7/T7 Froid CS 13</p> <p>Longueur : 1388 mm Diamètre : 570 mm Épaisseur vitrole : 65 mm Masse : 1900 kg</p>  <p>COG-150 CSD-U</p>	<p>CS Piver type II CS 10-2</p> <p>Longueur : 1040 mm Diamètre : 570 mm Épaisseur vitrole : 65 mm Masse : 1393 kg</p>  <p>CEA-200 Piver Type II</p>	
<p>Extrait de C.I.M.AE11.13.0069.D</p>	<p>Représentation des conteneurs de stockage HA</p>		<p>CS Piver type IV CS 10-4</p> <p>Longueur : 1383 mm Diamètre : 570 mm Épaisseur vitrole : 65 mm Masse : 1813 kg</p>  <p>CEA-200 Piver Type IV</p>



Annexe 6 : Extrait du guide de sûreté ASN-2008 relatif aux critères techniques de site

« Les critères essentiels de choix d'un site sont les suivants :

- **Stabilité**

La stabilité du milieu géologique devra être telle que les éventuelles modifications des conditions initiales dues aux phénomènes naturels qui peuvent survenir (glaciation, sismicité, mouvements néotectoniques) restent acceptables du point de vue de la sûreté du stockage. Il est recommandé que le choix du site et la conception de l'installation de stockage soient tels que l'évolution du système de stockage puisse être déterminée sur une période de temps permettant une décroissance substantielle de l'activité des radionucléides présents dans l'inventaire des colis de déchets. En particulier, la stabilité du milieu géologique (qui englobe une évolution limitée et prévisible) devra être démontrée pour une période au moins égale à 10 000 ans.

- **Hydrogéologie**

L'hydrogéologie du site devra être caractérisée par une très faible perméabilité de la formation hôte et un faible gradient de charge hydraulique. Un faible gradient régional hydraulique sera par ailleurs recherché pour les formations environnantes de la roche hôte.

Des mesures hydrogéologiques devront être réalisées sur une zone beaucoup plus large que celle du site de façon à pouvoir bâtir des modèles d'écoulement prenant en compte les flux depuis les zones d'alimentation jusqu'aux exutoires. Ces modèles régionaux devront permettre de simuler la vitesse et la direction des circulations souterraines.

Il convient de repérer, caractériser et prendre en compte les discontinuités ou les hétérogénéités conductrices d'eau dont la nature et la géométrie pourraient localement amoindrir la capacité de la roche hôte à participer aux fonctions de sûreté.

- **Respect d'une profondeur minimale**

Le site devra être choisi de telle sorte que la profondeur retenue pour les ouvrages de stockage des déchets visés par la présente règle permette de garantir que la sûreté du stockage ne sera pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion (notamment à la suite d'une glaciation), par l'effet d'un séisme, ou par les suites d'une intrusion humaine «banale».

L'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est a priori de l'ordre de 200 mètres.

- **Absence de stérilisation de ressources souterraines extractibles**

Le site devra être choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines ».

Annexe 7 : Les performances des déchets vitrifiés HA

On distingue, d'une part les déchets vitrifiés CSD-V d'AREVA, d'autres parts les autres déchets vitrifiés.

Les déchets vitrifiés CSD-V d'AREVA

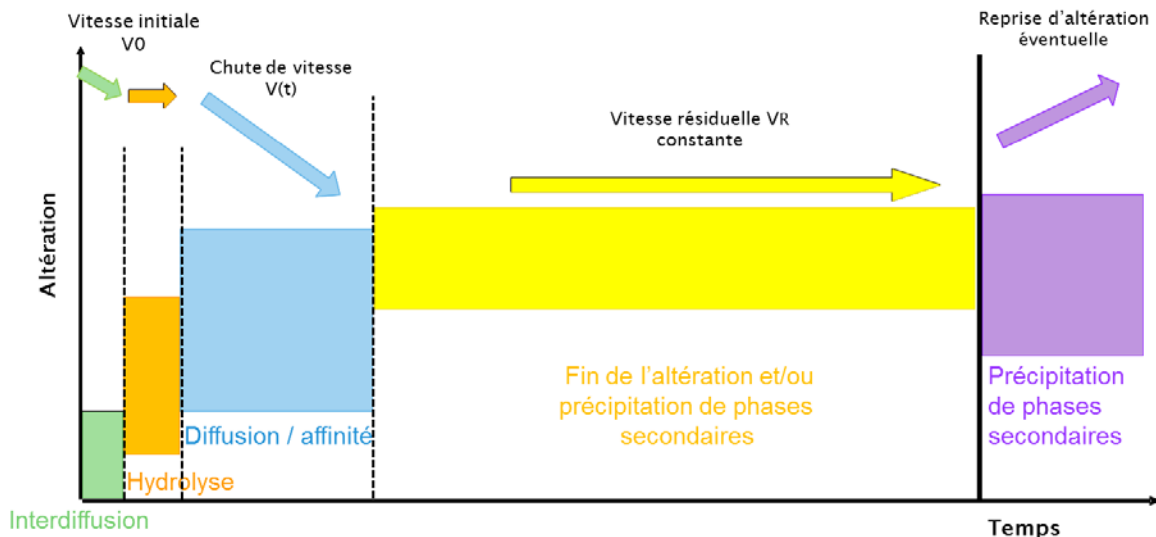
Ce chapitre traite des déchets vitrifiés des familles COG-140 et COG-800 pour lesquelles il existe un retour d'expérience important.

▪ Une connaissance du comportement reposant sur plus de 30 ans de R&D

La R&D menée depuis plus de 30 sur les déchets vitrifiés a conduit à définir une évolution de l'altération du verre en fonction du temps (cf. Figure 2.4-3) qui fait aujourd'hui l'objet d'un consensus au niveau international. Le verre s'altère tout d'abord suivant une vitesse initiale V_0 , puis suivant une vitesse résiduelle V_R très inférieure à la vitesse initiale V_0 (environ 4 ordres de grandeur à 50 °C). Entre ces deux régimes, il existe un régime d'altération transitoire appelé « chute de vitesse ».

L'altération du verre en régime de vitesse initiale est principalement pilotée par l'hydrolyse du réseau silicaté. La vitesse initiale d'altération augmente avec l'augmentation du pH et de la température. Les exigences portant sur un pH proche de la neutralité et la limitation de la température à 70 °C lors de la rupture du conteneur de stockage permettent ainsi de limiter la vitesse de relâchement initial des déchets vitrifiés. La variabilité de la vitesse initiale d'altération des verres R7/T7 dans la gamme de composition des verres R7/T7 telle que spécifiée par AREVA est faible (environ un facteur 4). Par ailleurs, les études ont permis d'acquérir la vitesse initiale d'altération des verres R7/T7 en présence d'une eau argileuse représentative des conditions attendues en stockage : elle est environ 5 fois plus importante que celle mesurée en eau désionisée du fait de sa concentration en ions alcalins et alcalino-terreux et dans une moindre mesure de son pH.

Le régime transitoire de chute de vitesse résulte de la diminution de l'affinité de la dissolution du verre et de la formation d'un gel passivant qui constitue une barrière diffusionnelle vis-à-vis des espèces chimiques et notamment du silicium. En l'absence de matériaux d'environnement, la quantité de verre altéré durant cette étape est faible comparativement aux deux autres étapes (régimes d'altération en vitesse initiale et en vitesse résiduelle).



CG.IM.ASCM.15.0054.A

Figure 2.4-3 : Évolution de la quantité de verre altéré au cours du temps associée à différents régimes de vitesse

Le régime d'altération en vitesse résiduelle résulte d'un équilibre entre, d'une part une limitation de l'affinité réactionnelle et du transport au sein de la pellicule d'altération du verre, d'autre part de la précipitation de phases secondaires plus ou moins cristallisées de type phyllosilicates qui entretiennent l'altération du verre en consommant du silicium. La vitesse résiduelle augmente lorsque la température augmente. Elle varie en fonction du pH selon les conditions d'altération et la composition du verre. La variabilité de la vitesse résiduelle d'altération des verres R7/T7 dans la gamme de composition des verres R7/T7 telle que spécifiée par AREVA est faible (de l'ordre d'un facteur 10). Par ailleurs, les études ont permis d'acquiescer la vitesse résiduelle d'altération des verres R7/T7 en présence d'une eau argileuse représentative des conditions attendues en stockage. Elle est très dépendante de la possibilité ou non de précipitation de phases silicatées magnésiennes qui conduisent expérimentalement à des vitesses résiduelles environ 5 fois plus importantes que celles mesurées en eau désionisée dans des conditions de renouvellement de l'eau plus pénalisantes que celles attendues en stockage. La précipitation de ces phases n'est possible qu'en présence de magnésium et qu'au-dessus d'un pH seuil. En l'absence d'un renouvellement du magnésium ou en cas de diminution du pH, la vitesse résiduelle mesurée est alors voisine de celle mesurée en eau désionisée.

Le temps de passage d'un régime en vitesse initiale à un régime en vitesse résiduelle est rapide en eau désionisée et en conditions statiques (et ce d'autant plus que la surface de verre est importante) mais dépendra en stockage des conditions d'environnement. Cette durée est directement liée aux interactions entre le silicium (relâché par le verre), le fer (chemisage, conteneur de stockage) et les produits de corrosion. Ces interactions sont pilotées à court terme par la sorption du silicium et à moyen et long terme par la co-précipitation du silicium avec le fer conduisant à la formation de silicates de fer. La nature des produits de corrosion a fait l'objet de nombreuses expérimentations en laboratoire jour et en Laboratoire souterrain et les résultats sont cohérents avec ceux issus de l'examen d'analogues archéologiques.

La reprise d'altération du verre conduit à une augmentation de la vitesse d'altération pouvant atteindre des valeurs proches mais inférieures à la vitesse initiale. Elle résulte de la précipitation de phases secondaires (principalement les zéolithes) qui n'ont été observées expérimentalement que pour des températures supérieures à 90 °C et des pH supérieurs à 10,5 à température ambiante. Les exigences portant sur un pH proche de la neutralité et la limitation de la température à 70 °C lors de la rupture du conteneur de stockage permettent ainsi de se prémunir de ce risque.

Après rupture du conteneur de stockage, l'altération des déchets vitrifiés pourrait débuter sous eau (conditions saturées) ou sous vapeur d'eau (conditions non saturées résultant notamment de la production d'hydrogène liée à la corrosion des matériaux métalliques du chemisage et du conteneur de stockage). Les études menées depuis un peu plus de 5 ans montrent que la vitesse d'altération du verre à 90 °C par de la vapeur d'eau (appelée vitesse d'hydratation ou V_{hydr}) est supérieure d'environ un ordre de grandeur à la vitesse résiduelle mesurée en eau pure à la même température. Cette vitesse est probablement surestimée car la seule expérimentation de longue durée montre une diminution dans le temps de la vitesse d'altération. Par ailleurs, la vitesse d'hydratation augmente avec l'augmentation de l'humidité relative et de la température. Elle est toujours très inférieure à la vitesse initiale d'altération. Lors de l'altération du verre sous vapeur d'eau, il n'y a pas de relâchement des radionucléides.

La quantité de verre altéré dépend de la vitesse d'altération et de la surface réactive du verre. Tout comme la vitesse d'altération, la surface réactive apparente est propre à chaque régime d'altération. Elle est égale à la surface totale du verre (soit environ 40 fois la surface externe du bloc de verre en intégrant la fracturation) en régime de vitesse résiduelle, et elle est environ 5 fois plus importante que la surface externe en régime de vitesse initiale. La surface réactive lors de l'altération du verre par de la vapeur d'eau n'est pas connue mais elle est vraisemblablement comprise entre les deux valeurs citées ci-dessus. Les mesures de la fracturation du verre ont été confortées par des simulations numériques. Les modèles développés montrent (i) que la fracturation est moins importante pour les verres élaborés en creuset froid que pour ceux élaborés en pot de fusion et (ii) que le risque de sur-fracturation en stockage du fait des contraintes lithostatiques peut être écarté.

L'essentiel de la R&D a été mené sur le verre de référence SON68 inactif mais des expérimentations sur des verres actifs ont également été réalisées afin de vérifier que leur comportement est bien similaire. Les études sur l'auto-irradiation des verres (jusqu'à des doses cumulées au moins égale à 10^{19} α/g) ne

montrent aucune modification de la microstructure et une augmentation de la résistance à la fissuration. Au-delà d'une dose cumulée de 4×10^{18} α /g, les propriétés physico-chimiques se stabilisent (équilibre entre la création de dommages et la restauration de l'état structural). La production d'hélium liée aux désintégrations α n'a pas de conséquences sur le comportement mécanique du verre jusqu'à des teneurs de 8×10^{19} He/g (correspondant à plusieurs millions d'années). Les études de lixiviation des verres actifs ne montrent pas de différences significatives avec celles réalisées sur des verres inactifs aussi bien en régime de vitesse initiale qu'en régime de vitesse résiduelle.

La mise en place d'un matériau de remplissage à l'extrados du chemisage nécessite d'en évaluer les conséquences vis-à-vis de l'altération des déchets vitrifiés. Les exigences indiquent, d'une part que le choix du matériau de remplissage limitera autant que possible les perturbations chimiques induites sur le verre nucléaire et sur la mobilité des radionucléides dissous, d'autre part que l'on recherchera un environnement physico-chimique favorable à la protection des colis de déchets avec notamment un pH proche de la neutralité dans l'alvéole. Le programme de R&D lancé en 2015 vise à vérifier que ces exigences sont bien satisfaites vis-à-vis (i) des vitesses d'altération initiales et résiduelles du verre, qui vont principalement dépendre du pH au voisinage du verre lors de l'arrivée de l'eau, et vis-à-vis (ii) du temps de passage en régime de vitesse résiduelle qui est fortement lié à la nature des produits de corrosion du chemisage et du conteneur de stockage.

▪ **Des modèles d'altérations majorants s'appuyant sur les connaissances phénoménologiques**

Le modèle d'altération développé par l'Andra, le CEA et les producteurs est décrit par la Figure 2.4-4. Il distingue 4 phases :

1. tant que le conteneur primaire est étanche, il n'y a pas d'altération du verre ;
2. après rupture du conteneur, le verre s'altère en conditions non saturées. En l'absence d'eau en phase liquide, il n'y a pas de relâchement de radionucléides ;
3. après la saturation en eau des jeux au sein du conteneur, le verre s'altère en régime de vitesse initiale. Le relâchement des radionucléides est alors congruent à l'altération du verre. Lors de la resaturation, les radionucléides localisés dans le verre altéré préalablement en conditions non saturées sont relâchés instantanément. Il s'agit d'une approche très majorante mais qui repose sur les expériences montrant un relâchement rapide des éléments traceurs d'un verre préalablement altéré par de la vapeur d'eau lorsqu'il est par la suite lixivié sous eau ;
4. une fois les matériaux métalliques totalement corrodés et les produits de corrosion saturés en silicium, le verre s'altère suivant la vitesse résiduelle V_r . Les hypothèses retenues à ce stade conduisent à majorer fortement le temps de passage en vitesse résiduelle. Il s'agira également d'évaluer l'effet du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage sur la nature des produits de corrosion et donc sur le temps de passage en vitesse résiduelle.

La durée de vie des colis de déchets vitrifiés dépend donc de paramètres intrinsèques au verre (vitesses d'altération, surfaces réactives...) mais également de paramètres liés aux matériaux métalliques (vitesses de corrosion, nature et propriétés des produits de corrosion) et aux conditions physico-chimiques régnant au sein de l'alvéole HA (évolution de la resaturation, pH, température). En fonction des conditions d'environnement, elle peut atteindre quelques centaines de milliers d'années.

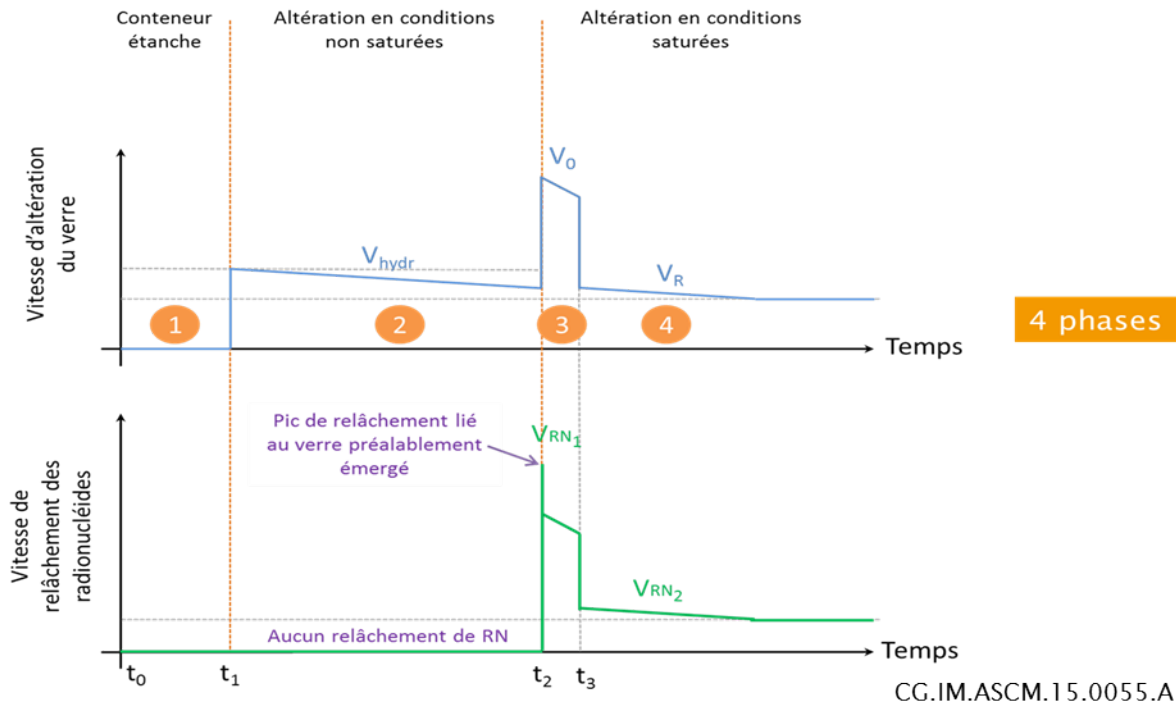


Figure 2.4-4 : Evolution de la vitesse d'altération du verre et de la vitesse de relâchement des radionucléides en fonction du temps pour les différentes phases d'altération du verre

L'application de ce modèle repose sur le caractère homogène du verre (notamment l'absence de cristallisation). Les spécifications de production, la composition du verre, le scénario de refroidissement et la température maximale du verre en période d'entreposage (température inférieure à 510 °C au cœur du verre) et en stockage (exigence d'une température inférieure à 450 °C à cœur du verre en conditions permanentes et à 500 °C en conditions transitoires d'au plus 24 heures résultant notamment du détensionnement du conteneur de stockage) garantissent la stabilité de la matrice vitreuse et le maintien de ses propriétés de confinement.

Les autres déchets vitrifiés

La Phénoménologie décrite ci-dessus pour les verres R7/T7 est transposable aux autres verres borosilicatés avec des jeux de paramètres spécifiques, mais le niveau de connaissances de ces différents verres (variabilité de la composition, comportement à long terme) ne permet pas de proposer dans tous les cas le même modèle d'altération.

Pour les verres appartenant au domaine de composition des verres R7/T7, le modèle développé ci-dessus est applicable. C'est notamment le cas des déchets vitrifiés d'Atalante (CEA-350) et d'une partie des verres de vidange (COG-810) et de calcinat (COG-820), des verres REP/RNR (COG-830), des verres résultant du traitement des combustibles MOX en mélange avec des combustibles usés UOX et URE (COG-200), des verres résultant du traitement des combustibles usés du CEA (COG-880 et COG-890) et des verres résultant du traitement du réacteur EL4 de Brennilis (COG-900).

Pour les verres AVM produits sous assurance qualité (CEA-1070) ainsi que les verres AVM produit hors assurance qualité mais dont la composition appartient au domaine de composition des verres produits en assurance qualité (une partie des verres CEA-1080), le modèle proposé ci-dessus est applicable avec un jeu de paramètres spécifiques. En l'absence de mesure de la vitesse d'hydratation, elle est assimilée de manière majorante à la vitesse initiale d'altération. Des études en cours visent à conforter l'application de ce modèle pour ces verres AVM en étudiant plus particulièrement le temps de passage de la vitesse initiale à la vitesse résiduelle.

Pour les autres verres AVM (une partie des verres CEA-1080), les verres PIVER (CEA-200) et les verres UMo (COG-150), le modèle proposé est une simplification du modèle précédent qui ne considère pas le régime d'altération en vitesse résiduelle du fait de l'absence de données. Par ailleurs, la vitesse d'hydratation n'étant pas connue, elle est assimilée à la vitesse initiale d'altération. Il en résulte un modèle d'altération qui majore fortement le relâchement des radionucléides et conduit à des durées de vie de quelques milliers d'années (quelques dizaines de milliers d'années pour les verres UMo).

Pour moins d'une dizaine de verres AVM présentant des compositions atypiques, le modèle proposé conduit de manière majorante à une altération très rapide du verre.

Pour les verres présentant des compositions atypiques rendant impossible toute transposition avec les verres borosilicatés connus et pour lesquels des paramètres dimensionnants ne sont pas connus (surface, vitesse initiale de lixiviation...), aucun modèle ne peut être proposé. C'est notamment le cas des verres VULCAIN et GULIVER (CEA-1190), des verres de vidanges et des verres de calcinât élaborés avec la frite de verre CE22 (une partie des COG-810 et des COG-820). Il s'agit d'un nombre très limité de colis.

Annexe 8 : Les performances des déchets MA-VL

Les déchets vitrifiés MA-VL

La matrice vitreuse des déchets vitrifiés MA-VL a pour fonction de « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » de par sa résistance à la lixiviation. La performance de ces colis est fonction des conditions d'environnement et donc de l'option de stockage retenue. Dans tous les cas, le schéma proposé à la Figure 2.4-3 est applicable. La vitesse d'hydratation est indépendante de l'option de stockage retenue (pas d'interaction avec les matériaux environnants) : lorsque cette vitesse n'est pas connue (verres AVM et verres de Valduc), elle est assimilée à la vitesse initiale d'altération. Les vitesses initiales et résiduelles sont quant à elles dépendantes de l'option de stockage retenue.

▪ **Stockage en alvéole HA : un comportement similaire aux déchets vitrifiés HA**

Le comportement des déchets vitrifiés MA-VL stockés en alvéole HA est identique à celui des colis vitrifiés HA. La composition des verres AVM (CEA-1120 à l'exception de ceux contenant du béryllium) entrant dans le domaine de composition des verres AVM produits sous assurance qualité (CEA-1070), un même modèle de relâchement intégrant la vitesse résiduelle est proposé.

Pour les autres verres AVM (CEA-1120), les verres MA-VL de Valduc (CEA-340) et les verres CSD-B (COG-340), le modèle proposé est une simplification du modèle des verres R7/T7 qui ne considère pas le régime d'altération en vitesse résiduelle du fait de l'absence de données. Il en résulte un modèle d'altération qui majore fortement le relâchement des radionucléides.

▪ **Stockage en alvéole MA-VL : des comportements différents suivant la nature du béton**

Dans l'hypothèse d'un stockage des déchets vitrifiés MA-VL en alvéole MA-VL, le verre sera alors lixivié par une eau cimentaire. La phénoménologie est identique à celle des déchets vitrifiés HA (Figure 2.4-3) mais il n'est plus possible d'écarter le risque de reprise d'altération du fait du pH élevé. Cette reprise d'altération a par ailleurs été observée expérimentalement dans certaines expérimentations (à 300 et 700 jours pour des expériences à pH 13,2 à 50 °C). En revanche, les expérimentations réalisées dans une eau à l'équilibre avec un béton bas pH montrent une chute de vitesse plus marquée (3 ordres de grandeur au lieu de 2 pour des bétons classiques) et l'absence de reprise d'altération. Les connaissances disponibles ne sont cependant pas suffisantes pour démontrer l'absence de risque de reprise d'altération et pour paramétrer un modèle intégrant une vitesse résiduelle. En conséquence, le modèle de relâchement proposé pour les options de stockage avec des bétons classiques ainsi que des bétons bas pH est un modèle simplifié majorant qui ne prend pas en compte le passage en vitesse résiduelle. Compte tenu de ces hypothèses, la durée de vie des déchets vitrifiés MA-VL est alors comprise entre quelques centaines et quelques milliers d'années.

Les déchets métalliques activés

Les processus mis en jeu et les paramètres associés dépendent de la localisation des radionucléides dans les déchets :

- le relâchement des radionucléides activés au sein des différents alliages repose sur les processus et paramètres suivants :
 - ✓ le processus d'oxydation du métal (corrosion du métal) ; les paramètres associés sont la vitesse de corrosion et l'épaisseur de la pièce métallique contenant des produits d'activation ;
 - ✓ la formation et la dissolution d'une couche d'oxyde en surface du métal, et une migration éventuelle des radionucléides au sein de cette couche d'oxyde ; les paramètres associés à ses processus de dissolution de l'oxyde et de migration des radionucléides au sein de l'oxyde ne sont pas connus à ce stade des études ;
- le relâchement des radionucléides localisés au sein de la zircone (cas des alliages de zirconium) s'effectue soit par dissolution de la zircone, soit par migration au sein de la zircone. A ce stade, aucun modèle de relâchement n'est proposé pour l'inventaire présent dans la zircone ;
- les radionucléides localisés à la surface des différents matériaux sont relâchés instantanément à l'arrivée de l'eau.

Les vitesses de corrosion des aciers inoxydables, des alliages de nickel et des alliages de zirconium ont fait l'objet de mesures expérimentales et d'une comparaison avec les données de la littérature. Les vitesses retenues privilégient les essais sur de longues durées réalisés suivant des conditions expérimentales proches de celles attendues en stockage : pH compris entre 9 (long terme) et 12,5/13,5 (court terme), conditions anoxiques, température comprise entre 25 °C et 50 °C, présence de chlorures...). Les vitesses de corrosion sont peu ou pas influencées par les effets de l'irradiation ainsi que par l'évolution de la température et du pH au cours du temps. Elles conduisent à un relâchement de la totalité des produits d'activation entre 10000 et 100000 ans.

Les déchets salins avec matrice bitume

La présence d'eau au contact des enrobés bitumineux conduit au relâchement des sels et des radionucléides suivant le processus décrit sur la Figure 2.4-5.

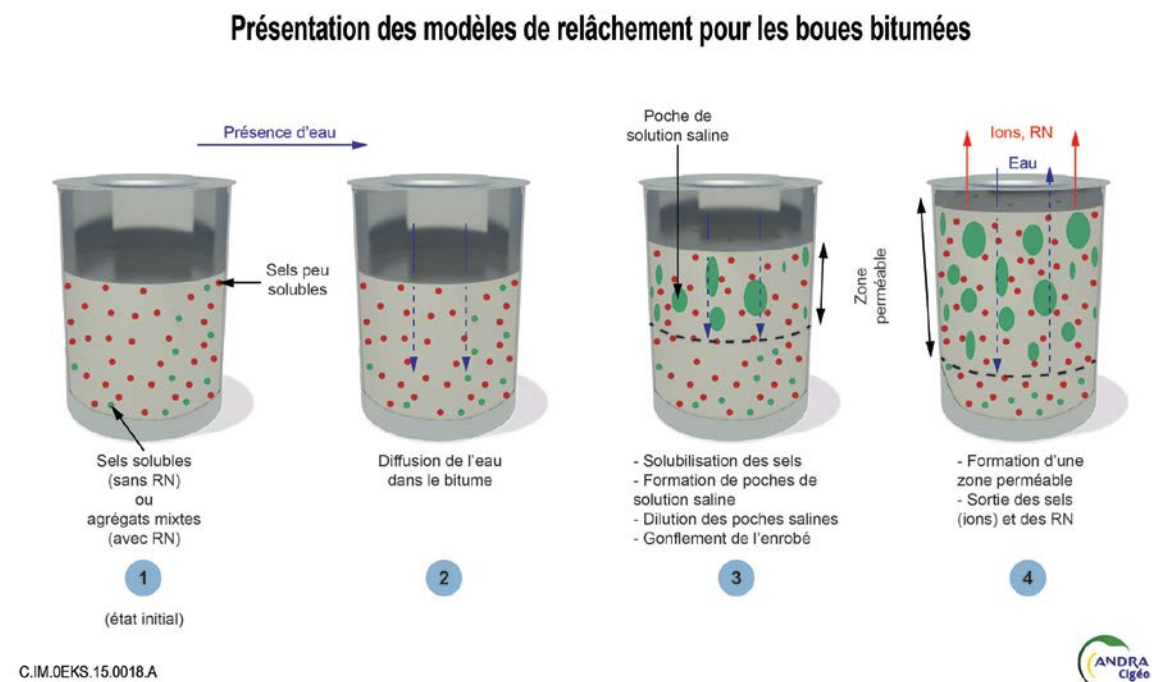


Figure 2.4-5 : *Relâchement des sels et des radionucléides suite à la reprise d'eau des enrobés bitumineux*

Ce processus de relâchement des radionucléides et des sels a fait l'objet d'un modèle appelé COLONBO dont le domaine de validité repose notamment sur les hypothèses suivantes :

- une teneur massique en sels solubles dans les enrobés comprise entre 2 % et 22 %, ce qui est le cas pour la plupart des colis à l'exception d'une partie des fûts anciens de la STEL ;
- une température comprise entre 20 à 30 °C : ce critère est couvert par l'exigence de placer les alvéoles de boues bitumées à une distance suffisante des autres alvéoles afin de ne pas excéder 30 °C au sein des déchets ;
- un pH compris entre 7 et 12,5 : le choix du matériau cimentaire utilisé pour les colis de conteneur et/ou les revêtements contribue à respecter cette gamme de pH ;
- un maintien de la géométrie : le modèle reposant sur la diffusion de l'eau et des sels, la performance du colis est très liée à la géométrie (épaisseur) de l'enrobé. Cette géométrie peut être maintenue tant que le colis de stockage reste intègre, soit une durée d'au moins 1000 ans. Après la rupture du colis de stockage, il n'est plus possible de maintenir la géométrie et le modèle n'est alors plus applicable.

Un modèle simplifié très majorant a été développé : ce modèle repose sur la solubilité des sels et ne prend pas en compte la matrice bitume. L'utilisation de ce modèle nécessite de le coupler avec les calculs de solubilité des sels dans l'alvéole dans un environnement cimentaire.

Les déchets salins non bitumés

Pour ces déchets salins qui ne comprennent pas de matrice bitume, seul le modèle reposant sur la solubilité des sels est applicable.

Annexe 9 : Familles co-stockables d'un point de vue physico-chimique

Identifiant Famille élémentaire	Intitulé Famille élémentaire	Catégorie
CEA-070	Conteneurs en béton de 500 litres contenant des fûts de boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique produits sous spécification d'assurance qualité	MA-VL1
CEA-100	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des fûts de 700 litres de concentrats à 800 g/l enrobés dans un liant hydraulique	MA-VL1
CEA-140	Conteneurs en béton de 500 litres produits avant 1994 et contenant des fûts de boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique	MA-VL1
CEA-150	Conteneurs en béton de 500 litres contenant des fûts de concentrats d'évaporation enrobés dans un liant hydraulique	MA-VL1
CEA-231	Fûts de sulfates de plomb radifères provenant de l'usine du Bouchet conditionnés en conteneurs béton de 5 m3	MA-VL1
CEA-232	Fûts de sulfates de plomb radifères provenant de l'usine du Bouchet conditionnés en conteneurs EIP	MA-VL1
CEA-280	Fûts 223 litres en acier non allié contenant des boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique (y compris fûts produits sous spécification d'assurance qualité)	MA-VL1
CEA-310	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs en béton 1000 litres contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume ou un mélange boues-ciment	MA-VL1
CEA-320	Fûts en acier contenant des boues ou concentrats ou un mélange de boues-concentrats cimentés	MA-VL1
CEA-1140	Fûts en acier inoxydable contenant des boues de filtration cimentées issues de l'installation STEMA	MA-VL1
COG-430	Boues STE2 séchées, compactées et immobilisées dans un conteneur métallique	MA-VL1
CEA-1000	Fûts en acier inoxydable contenant fûts en acier inoxydable d'enrobés bitumineux produits sous spécification d'assurance qualité (à partir d'octobre 1996)	MA-VL2
CEA-1010	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits sous spécification d'assurance qualité (de 1995 à 1996)	MA-VL2
CEA-1020	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits avant 1995, transportés en colis primaires	MA-VL2
CEA-1021	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits avant 1995, transportés en colis de stockage	MA-VL2
COG-020	Fûts bitumes STE3 produits suivant la spécification 300 AQ 027	MA-VL2
COG-420	Fûts enrobés bitumineux STE2 (reprise partielle silo 550-14)	MA-VL2
CEA-370	Objets exotiques de Phénix	MA-VL3
CEA-420	Déchets issus de l'exploitation et du DEM de diverses installations de FONTENAY-aux-ROSES	MA-VL3
CEA-1040	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets de procédé cimentés	MA-VL3
COG-040	Fûts de coques et embouts cimentés produits suivant la spécification 300 AQ 025	MA-VL3
COG-070	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des coques et embouts du silo HAO	MA-VL3
COG-440	Fût ECE cimenté de fines et résines du silo HAO	MA-VL3
AND-000	Déchets collectés par l'Andra conditionnés en conteneur 870 L (sources scellées usagées...)	MA-VL3
CEA-050	Conteneurs 870 litres en acier non allié produits sous spécification d'assurance qualité (à partir du 01/01/94) contenant des déchets divers (alpha Pu prépondérant) bloqués dans un liant hydraulique	MA-VL3
CEA-060	Conteneurs en acier de 500 litres produits depuis 1994 sous spécification d'assurance qualité et contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	MA-VL3

Identifiant Famille élémentaire	Intitulé Famille élémentaire	Catégorie
CEA-080	Conteneurs 870 litres en acier non allié produits de 1972 à 1990 contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	MA-VL3
CEA-090	Conteneurs 870 litres en acier non allié produits de 1990 à fin 1993 contenant des déchets divers (alpha Pu prépondérant) bloqués dans un liant hydraulique	MA-VL3
CEA-110	Conteneurs 500 litres en acier non allié produits de 1970 à 1990 contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	MA-VL3
CEA-120	Conteneurs 500 litres en acier non allié produits de 1990 à 1994 contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	MA-VL3
CEA-270	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique (CEA/DAM Valduc)	MA-VL3
CEA-290	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs en béton 1800 litres contenant des déchets divers bloqués dans un liant hydraulique	MA-VL3
CEA-300	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs en béton 1800 litres contenant des déchets divers bloqués dans une matrice ciment-bitume	MA-VL3
CEA-330	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des déchets métalliques et organiques "Pégase"	MA-VL3
CEA-400	Déchets irradiants issus du DEM de Rapsodie, de l'assainissement des fosses de CADARACHE et de l'exploitation et DEM RJH	MA-VL3
CEA-410	Déchets irradiants issus de l'exploitation et du DEM de diverses installations de SACLAY	MA-VL3
CEA-440	Conteneurs 500 litres en acier inoxydable contenant des déchets divers non compactables bloqués dans un liant hydraulique (exploitation CABRI, DMT Rapsodie, fosses CAD, CENG)	MA-VL3
CEA-450	Conteneurs en acier non allié issus du reconditionnement de conteneurs bétons dits "Blocs sources"	MA-VL3
CEA-460	Déchets de déconstruction des installations du centre CEA Valduc	MA-VL3
CEA-480	Colis 223 litres pré-bétonnés hors normes	MA-VL3
CEA-1090	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique	MA-VL3
CEA-1100	Conteneurs 870 litres en acier non allié contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique (déchets alpha MARCOULE)	MA-VL3
CEA-1110	Déchets technologiques issus de l'AVM	MA-VL3
CEA-1151	Déchets de structure, divers déchets métalliques et déchets de DEM des chaînes TOP et TOR, à reconditionner en fûts EIP	MA-VL3
CEA-1152	Déchets de structure, divers déchets métalliques et déchets de DEM des chaînes TOP et TOR	MA-VL3
CEA-1180	Futs alpha 200 litres entreposés au bâtiment 99 de la zone nord CDS à placer provisoirement dans une coque réversible de 500 litres	MA-VL3
CEA-1510	Sources radioactives (alpha, neutroniques et divers)	MA-VL3
COG-030	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés produits après 1994 suivant la spécification 300 AQ 044	MA-VL3
COG-050	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés produits avant 1994 suivant la spécification 300 AQ 038	MA-VL3
COG-400 ¹⁴⁰	Déchets alpha en provenance de Mélox et LHA	MA-VL3
COG-460	Conteneurs Standards de Déchets Compactés CSD-C contenant des déchets technologiques métalliques et organiques et des déchets de DEM	MA-VL3
COG-480	Colis CBF-C'2 contenant des déchets d'exploitation et de DEM (poubelles fosse ATTILA)	MA-VL3
COG-490	Déchets issus des opérations de CDE DEM des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 compactés en CSD-C	MA-VL3

¹⁴⁰ Cette famille pourrait relever à terme de la catégorie MA-VL6 selon son conditionnement

Identifiant Famille élémentaire	Intitulé Famille élémentaire	Catégorie
COG-500	Déchets issus des opérations de CDE DEM des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 conditionnés en CBF-C'2	MA-VL3
COG-510	Déchets issus des opérations de CDE DEM de l'usine MELOX conditionnés en CBF-C'2	MA-VL3
COG-520	Déchets issus des opérations de CDE DEM des installations CFCa CADARACHE conditionnés en CBF- C'2	MA-VL3
EDF-120	Déchets AMI Chinon	MA-VL3
CEA-1050	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets de structure métalliques cimentés (y compris le DEM des Célestins)	MA-VL4
CEA-1060	Fûts en acier inoxydable contenant des déchets de structure magnésiens bloqués dans un liant hydraulique	MA-VL4
EDF-080	C1PG de DAE REP	MA-VL4
EDF-090	C1PG de DAD 1er train hors déchets sodés Superphénix	MA-VL4
EDF-100	DAD des REP du parc actuel (dont BCOT)	MA-VL4
ITER-010	Déchets divers produits pendant les phases d'exploitation, de maintenance et de déconstruction du réacteur ITER	MA-VL4
CEA-360	Déchets issus du DEM des objets du cœur de Phénix	MA-VL5
CEA-430	Déchets divers issus des phases d'exploitation, d'assainissement et de DEM de diverses installations du Centre de GRENOBLE	MA-VL5
CEA-1200	Déchets divers entreposés dans les bâtiments 211 et 213 (hors conteneurs de déchets vitrifiés PIVER et autres verres HA)	MA-VL5
COG-100	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C produits suivant la spécification 300 AQ 055 (dont coques et embouts des fûts ECE et des piscines S1, S2 et S3)	MA-VL5
COG-110	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des coques et embouts issus d'assemblages combustibles UOX	MA-VL5
COG-120	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des coques et embouts issus d'assemblages combustibles UOX/URE/MOX	MA-VL5
COG-450	Conteneurs Standards de Déchets Compactés/CSD-C contenant des déchets de structure issus d'assemblages combustibles REP et RNR Superphénix et Phénix)	MA-VL5
COG-550	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU EL4	MA-VL5
EDF-110	Crayons sources primaires et secondaires REP et autres sources scellées diverses	MA-VL5
COG-530	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU du CEA/Civil	MA-VL5
COG-540	Colis de déchets de structure compactés issus du traitement des CU du CEA/DAM	MA-VL5
CEA-340	Conteneur standard de déchets (CSD) contenant des effluents amériociés vitrifiés (verre MAVL Valduc)	MA-VL6
CEA-1120	Conteneurs type AVM en acier inoxydable contenant des déchets vitrifiés issus des effluents de rinçage UPI MARCOULE (verres MAVL)	MA-VL6
COG-470	Colis CSD-B contenant des effluents de moyenne activité vitrifiés (MAD UP2-400, UP2-800 et UP3)	MA-VL6
CEA-380	Déchets divers contenant du B4C issus des phases d'exploitation et de DEM des réacteurs RNR Rapsodie et Phénix	MA-VL7
EDF-250	Déchets divers contenant du B4C issus des phases d'exploitation et de DEM du réacteur RNR SuperPhénix	MA-VL7

ANNEXES DU VOLUME III

Annexe 10 : Tableaux récapitulatifs des choix structurants de représentation des caractéristiques des composants du système de stockage

▪ *Choix des groupes de référence hypothétiques*

Tableau 2.4-5 : *Groupes de référence hypothétiques identifiés pour une biosphère type tempérée*

Groupes de référence hypothétique	Activités amenant à une exposition potentielle	Biosphère type tempérée			
		Exutoire : Puits dans les calcaires du Barrois Débits d'exploitation envisageables 150 L.mn ⁻¹		Exutoire : Forage au Dogger dans la zone de fracturation diffuse Débit d'exploitation envisageable : 100 L.mn ⁻¹	
		Choix	Justification	Choix	Justification
Multi-activités	Regroupe la culture intensive de céréales, l'élevage, un jardin potager une basse-cour Régime alimentaire : comportement moyen basé sur enquête (OPE)	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique multi-activités avec irrigation des cultures céréalières : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Agriculture de céréales avec irrigation ✓ Élevage de bovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Quantification pour le DOS 	<ul style="list-style-type: none"> • Activités observées actuellement. • Irrigation non observée actuellement mais activité potentielle avec la gamme de débits évalués • Permet d'explorer toutes les voies de transfert associées à un puits dans le Barrois 	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique multi-activités sans irrigation des cultures céréalières : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Élevage de bovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Quantification pour le DOS 	<ul style="list-style-type: none"> • Activités observées actuellement. • Irrigation non observée actuellement. Pas de potentiel avec la gamme de débits évalués. Activité non retenue. • Permet d'explorer les voies de transfert associées à l'exploitation d'un forage dans le Dogger sans irrigation de cultures céréalières

Groupes de référence hypothétique	Activités amenant à une exposition potentielle	Biosphère type tempéré			
		Exutoire : Puits dans les calcaires du Barrois Débits d'exploitation envisageables 150 L.mn ⁻¹		Exutoire : Forage au Dogger dans la zone de fracturation diffuse Débit d'exploitation envisageable : 100 L.mn ⁻¹	
		Choix	Justification	Choix	Justification
Agriculteur	<p><u>Activité spécifique</u> : Grandes cultures (céréales...)</p> <p>Régime alimentaire adapté (grosse consommation de produits issus de l'agriculture de céréales)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique d'agriculteur pratiquant une culture intensive de céréales avec irrigation (sans élevage de bovins) : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Agriculture de céréales avec irrigation ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité observée actuellement. • Irrigation non observée actuellement mais activité potentielle avec la gamme de débits évalués • Permet d'explorer une voie d'exposition particulière associée à la culture de céréales 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité de culture intensive de céréale avec irrigation non retenue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de potentiel avec la gamme de débits évalués.
Éleveur	<p><u>Activité spécifique</u> : Tout élevage (bovins, ovins, caprins, porcins, rennes, chevaux, autruches,...)</p> <p>Régime alimentaire adapté (grosse consommation de produits animaux issus de l'élevage)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique éleveur de bovins et ovins : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Élevage de bovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Élevage de bovins observé • Permet d'explorer une voie d'exposition particulière associée à la consommation des produits animaux issus de son élevage 	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique d'éleveur de bovins : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Élevage de bovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Élevages de bovins et ovins observés • Permet d'explorer une voie d'exposition particulière associée à la consommation des produits animaux issus de son élevage

Groupes de référence hypothétique	Activités amenant à une exposition potentielle	Biosphère type tempéré			
		Exutoire : Puits dans les calcaires du Barrois Débits d'exploitation envisageables 150 L.mn ⁻¹		Exutoire : Forage au Dogger dans la zone de fracturation diffuse Débit d'exploitation envisageable : 100 L.mn ⁻¹	
		Choix	Justification	Choix	Justification
Villageois	<u>Activité spécifique</u> Jardin potager, Basse-cour, Habitation Régime alimentaire adapté (consommation de produits végétaux et animaux issus du jardin potager et de la basse-cour)	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique Villageois : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Observée actuellement • Permet d'explorer les voies d'expositions particulières associées à la consommation en autarcie des produits issus du jardin et de la basse-cour 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem Barrois • Groupe de référence hypothétique Villageois : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem Barrois
Pêcheur	<u>Activité spécifique</u> Pêche de poissons (eau douce ou pas), Crustacés, mollusques	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière
Chasseur	Gibier	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière
Cueilleur	Champignons, baies	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière
Touriste	Occasionnel (baignade, promenade, pique-nique)	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de plan d'eau potentiellement contaminé 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de plan d'eau potentiellement contaminé
Activité spécifique	Viticulture, scierie, carrière sur la base des observations locales	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Non observée sur la ZIRA 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Non observée sur la ZIRA

Tableau 2.4-6 : Groupes de référence hypothétiques identifiés pour une biosphère type tempérée

Groupes potentiellement exposés	Détail des activités amenant à une exposition potentielle	Biosphère chaude tropicale humide de type Cr			
		Exutoire : Puits dans les calcaires du Barrois Débits d'exploitation envisageables 150 L.mn ⁻¹		Exutoire : Forage au Dogger dans la zone de fracturation diffuse Débit d'exploitation envisageable : 100 L.mn ⁻¹	
		Choix	Justification	Choix	Justification
Multi-activités	Regroupe agriculture, élevage, jardin potager et basse-cour, chasse, pêche, loisirs Régime alimentaire : comportement moyen basé sur enquête (OPE)	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique multi-activités avec irrigation des cultures céréalières : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Agriculture de céréales avec irrigation ✓ Élevage de bovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Quantification pour le DOS 	<ul style="list-style-type: none"> • Activités observées actuellement. • Irrigation non observée actuellement mais activité potentielle avec la gamme de débits évalués • Permet d'explorer toutes les voies de transfert associées à un puits dans le Barrois 	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique multi-activités sans irrigation des cultures céréalières : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Élevage de bovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Quantification pour le DOS 	<ul style="list-style-type: none"> • Activités observées actuellement. • Irrigation non observée actuellement. Pas de potentiel avec la gamme de débits évalués. Activité non retenue. • Permet d'explorer les voies de transfert associées à l'exploitation d'un forage dans le Dogger sans irrigation de cultures céréalières
Agriculteur	<u>Activité spécifique</u> : Grandes cultures (céréales...) Régime alimentaire adapté (grosse consommation de produits issus de l'agriculture de céréales)	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique d'agriculteur pratiquant une culture intensive de céréales avec irrigation (sans élevage de bovins) : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Agriculture de céréales avec irrigation ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité observée actuellement. • Irrigation non observée actuellement mais activité potentielle avec la gamme de débits évalués • Permet d'explorer une voie d'exposition particulière associée à la culture de céréales 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité de culture intensive de céréale avec irrigation non retenue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de potentiel avec la gamme de débits évalués.

Groupes potentiellement exposés	Détail des activités amenant à une exposition potentielle	Biosphère chaude tropicale humide de type Cr			
		Exutoire : Puits dans les calcaires du Barrois Débits d'exploitation envisageables 150 L.mn ⁻¹		Exutoire : Forage au Dogger dans la zone de fracturation diffuse Débit d'exploitation envisageable : 100 L.mn ⁻¹	
		Choix	Justification	Choix	Justification
Éleveur	<p><u>Activité spécifique</u> : Tout élevage (bovins, ovins, caprins, porcins, rennes, chevaux, autruches,...)</p> <p>Régime alimentaire adapté (grosse consommation de produits animaux issus de l'élevage)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique éleveur de bovins/ovins : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Élevage de bovins/ovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Élevage de bovins observé • Permet d'explorer une voie d'exposition particulière associée à la consommation des produits animaux issus de son élevage 	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique d'éleveur de bovins et ovins : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Élevage de bovins ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Élevages de bovins et ovins observés • Permet d'explorer une voie d'exposition particulière associée à la consommation des produits animaux issus de son élevage
Villageois	<p><u>Activité spécifique</u> Jardin potager, Basse-cour, Habitation</p> <p>Régime alimentaire adapté (consommation de produits végétaux et animaux issus du jardin potager et de la basse-cour)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique Villageois • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Observée actuellement • Permet d'explorer les voies d'expositions particulières associées à la consommation en autarcie des produits issus du jardin et de la basse-cour 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem Barrois • Groupe de référence hypothétique Villageois : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Jardin potager ✓ Basse-cour • Évaluation pour la DAC avec prise en compte d'un régime alimentaire adapté 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem Barrois
Pêcheur	<p><u>Activité spécifique</u> Pêche de poissons (eau douce ou pas), Crustacés, mollusques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière
Chasseur	Gibier	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière
Cueilleur	Champignons, baies	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exutoire rivière

Groupes potentiellement exposés	Détail des activités amenant à une exposition potentielle	Biosphère chaude tropicale humide de type Cr			
		Exutoire : Puits dans les calcaires du Barrois Débits d'exploitation envisageables 150 L.mn ⁻¹		Exutoire : Forage au Dogger dans la zone de fracturation diffuse Débit d'exploitation envisageable : 100 L.mn ⁻¹	
		Choix	Justification	Choix	Justification
Touriste	Occasionnel (baignade, promenade, pique-nique)	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de plan d'eau potentiellement contaminé 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité non retenue 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de plan d'eau potentiellement contaminé
Activité spécifique	Viticulture, scierie, carrière sur la base des observations locales	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique pratiquant la culture fruitière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité potentielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de référence hypothétique pratiquant la culture fruitière 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité potentielle

▪ **Choix structurants de représentation des argilites endommagées mécaniquement**

Tableau 2.4-7 : Caractéristiques de transport et rétention des zones fracturées connectées (ZFC) et à fracturation diffuse (ZFD)

Caractéristiques ou processus	Situation du SEN	Choix structurant de représentation de la zone fracturée connectée (ZFC)	Choix structurant de représentation de la zone à fracturation discrète (ZFD)
Perméabilité	Référence	<ul style="list-style-type: none"> Hors zone de dépose du revêtement : valeur correspondant à une cicatrisation hydraulique efficace dégradée de deux ordres de grandeurs Au droit des zones de dépose (scellements) : valeurs phénoménologiques prenant en compte une cicatrisation hydraulique efficace (auto-colmatage et fermeture des fractures). 	Non représentée
	Situation enveloppe	<ul style="list-style-type: none"> Hors zone de dépose du revêtement : Valeur retenue en référence dégradée d'un ordre de grandeur. Au droit des zones de dépose (scellements) : cicatrisation hydraulique efficace dégradée d'un ordre de grandeur 	Valeur conservative issue des mesures réalisées au Laboratoire souterrain dans cette zone, après excavation.
Coefficients de diffusion	Référence et enveloppe	Facteurs correctifs majorant la diffusion par rapport au Callovo-Oxfordien sain.	Valeurs mesurées dans le Callovo-Oxfordien sain.
Porosités accessibles	Référence et enveloppe	Facteurs correctifs minorant la porosité accessible	Valeurs mesurées dans le Callovo-Oxfordien sain.
Coefficients de partage (Kd)	Référence et enveloppe	Valeurs conservatives (Kd min).	Valeurs mesurées dans le Callovo-Oxfordien sain.
Limite de solubilité (C _{sat})	Référence et enveloppe	Valeurs conservatives (C _{sat} max).	Valeurs mesurées dans le Callovo-Oxfordien sain.

▪ **Choix structurants de représentation de la perturbation alcaline**

Tableau 2.4-8 : Caractéristiques de transport et de rétention retenues dans les argilites fracturées (ZFC) sous influence de la perturbation alcaline

		ZFC reminéralisée au contact d'un béton classique	ZFC influencée par un panache alcalin sans reminéralisation (béton classique ou bas pH)
Extension	Critères	Correspond à une transformation de toute la smectite ([smectite]=0)	Force ionique (I > 0,2M), [K] >10 ⁻² mol.L ⁻¹
	Au contact du béton bas pH	Non représentée	Non représentée
	Au droit des galeries remblayées	CCC cm Intégré au revêtement	Représentée Épaisseur < mm cm
	Au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL	Représentée Épaisseur DDD cm	Représentée Épaisseur < mm cm
	Au droit des alvéoles HA	Représentée sur toute l'épaisseur de la ZFC (XXX cm)	Représentée Épaisseur < mm cm
Perméabilité		Perméabilité pénalisante équivalente à celle d'un sable	Sans effet
Caractéristiques de transport et rétention : Situation de référence	Anions (Chlore 36, iode 129, aluminium 26, sélénium 79)	De et porosité accessible pénalisants (D ₀ dans la porosité) Csat pénalisant*	De et porosité accessible majorés en fonction de la force ionique (I) Csat pénalisant*
	Alcalins, Alcalino-terreux	De pénalisants (D ₀ dans la porosité) Facteurs correctifs appliqués au Kd conservatif (en fonction de la force ionique et de [K]) Csat pénalisant*	Facteurs correctifs appliqués au Kd conservatif (en fonction de la force ionique et de [K]) Csat pénalisant*
	Autres Radionucléides	De pénalisants (D ₀ dans la porosité) Kd, Csat : sans effet (valeurs conservatives appliquées à la ZFC) Csat pénalisant*	Sans effet (valeurs conservatives appliquées à la ZFC) Csat pénalisant*
Caractéristiques de transport et rétention : Situation enveloppe	Tous les radionucléides	Valeurs de perméabilité pénalisante équivalente à celles d'un sable De et porosité accessible pénalisants (diffusion dans l'eau D ₀) Kd, Csat non représentés (Kd=0, Csat=∞)	Même traitement qu'en situation de référence

* Pour une force ionique supérieure à 4 fois la force ionique des eaux du COx non perturbé

▪ **Choix structurants de représentation des caractéristiques de rétention potentiellement influencées par un panache de substances organiques ou salin**

Tableau 2.4-9 : Caractéristiques de rétention chimique dans les argilites (saines ou endommagées) affectées par le panache de substances organiques complexantes

Radionucléides	Dans le Callovo-Oxfordien sain, dans les ZFC et ZFD	
	Effet si : [ISA] > 1.10 ⁻⁴ mol.L ⁻¹ (ou [L]* > 1.10 ⁻³ mol.L ⁻¹)	Effet si : [ISA] > 1.10 ⁻³ mol.L ⁻¹ (ou [L]* > 1.10 ⁻² mol.L ⁻¹)
Chlore 36, iode 129, aluminium 26, sélénium 79	Kd : sans effet (Kd=0) Csat : sans effet	Kd : sans effet (Kd=0) Csat : sans effet
Alcalins	Sans effet	Sans effet
Actinides et lanthanides	Kd pénalisant (facteur 0.1) Csat pénalisant (facteur majorant)	Kd pénalisant (facteur 0.01) Csat pénalisant (facteur majorant)
Autres radionucléides		

* [L] : complexants organiques des déchets hors ISA, exclut les adjuvants cimentaires et les organiques non complexants

Tableau 2.4-10 : Caractéristiques de rétention chimique dans les matériaux cimentaires affectés par le panache de substances organiques complexantes

Radionucléides	Effet lié à la présence de ligands (hors ISA) Effet si : [L]* > 1.10 ⁻³ mol.L ⁻¹	Effet lié à la présence d'ISA (cumulé à celui lié à [L])		
		[ISA] = 1.10 ⁻⁴ mol.L ⁻¹ Effet si : 1.10 ⁻⁵ ≤ [ISA] < 1.10 ⁻⁴ mol.L ⁻¹	[ISA] = 1.10 ⁻³ mol.L ⁻¹ Effet si : 1.10 ⁻⁴ mol.L ⁻¹ ≤ [ISA] < 1.10 ⁻³ mol.L ⁻¹	Effet si : 10 ⁻³ mol.L ⁻¹ ≤ [ISA]
Chlore 36, iode 129, aluminium 26, sélénium 79	Kd conservatif Csat conservatif	Sans effet	Kd conservatif Csat conservatif	Kd pénalisant (conservatif * 0.1) Csat pénalisant (conservatif*facteur majorant)
Alcalins	Sans effet	Sans effet	Sans effet	Sans effet
Actinides et lanthanides	Kd conservatif Csat conservatif	Kd conservatif Csat : sans effet	Kd pénalisant (conservatif *0.1) Csat pénalisant (conservatif*facteur majorant)	Kd pénalisant (conservatif * 0.01) Csat pénalisant (conservatif*facteur majorant)
Autres radionucléides	Kd conservatif Csat conservatif	Sans effet	Sans effet	Kd pénalisant (conservatif * 0.1) Csat pénalisant (conservatif*facteur majorant)

* [L] : complexants organiques des déchets hors ISA, exclut les adjuvants cimentaires et les organiques non complexants

Tableau 2.4-11 : Caractéristiques de transport et rétention retenues dans les matériaux affectés par le panache salin

Radionucléides	Argilites saines et endommagées mécaniquement	Béton standard (si FI > 1M)	Noyaux argileux
Chlore 36, iode 129, aluminium 26, sélénium 79	De majorés en fonction de la force ionique Kd : sans effet C _{sat} pénalisant*	Kd pénalisant C _{sat} pénalisant	Non représenté : couvert par le degré de conservatisme des paramètres de rétention et de transport dans le noyau argileux
Alcalins, Alcalino-terreux	Kd diminué en fonction de la force ionique et de la concentration en [K] C _{sat} pénalisant*	Kd pénalisant C _{sat} pénalisant	
Autres Radionucléides	Kd : sans effet C _{sat} pénalisant*	Kd pénalisant C _{sat} pénalisant	

* si la force ionique est supérieure à 4 fois la force ionique des eaux du Callovo-Oxfordien non perturbé

Tableau 2.4-12 : Caractéristiques de transport et rétention retenues dans le noyau argileux

		Représentation du noyau argileux en référence	Représentation du noyau argileux en situation enveloppe
Extension		Propriétés uniformes dans tout le noyau argileux	
Perméabilité		Perméabilité définie par les exigences	
Diffusion		Valeurs conservatives, cohérentes avec la perméabilité exigée	Valeurs pénalisantes.
Rétention	Anions (Chlore 36, iode 129, aluminium 26, sélénium 79)	Rétention non représentée (Kd=0, C _{sat} =∞)	Rétention non représentée (Kd=0, C _{sat} =∞)
	Alcalins, Alcalino-terreux	Paramètres de rétention définis en fonction de la teneur minimale en smectites, permettant de couvrir le cumul d'incertitudes	
	Autres Radionucléides	Paramètres de rétention définis en fonction de la teneur minimale en smectites	

Annexe 11 : Intrusions humaines Recommandations du guide de sûreté du stockage géologique et pratiques internationales Intrusions humaines Recommandations du guide de sûreté du stockage géologique et pratiques internationales

Recommandations du guide de sûreté de l'ASN de 2008 relatif aux scénarios d'intrusions

Le Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de l'ASN (1) fixe à 200 m la profondeur minimale permettant de garantir que « [...] la sûreté du stockage ne sera pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion (notamment à la suite d'une glaciation), par l'effet d'un séisme, ou par les suites d'une intrusion humaine «banale». »

Par ailleurs, il est demandé que le site soit choisi « de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines » dans l'objectif de ne pas « stériliser des ressources souterraines extractibles ». Cette disposition contribue également à induire une limitation de la probabilité d'occurrence d'ouvrage de reconnaissance ou d'exploitation. Ces deux contraintes sont satisfaites à l'intérieur de la ZIRA.

Le guide précise ensuite la nature des situations à étudier dans le cadre des analyses de sûreté : « [...] 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 les ouvrages de stockage et la biosphère. »

L'annexe 2 du guide de sûreté (1) détaille les différentes situations et hypothèses à considérer au titre des intrusions humaines :

- en termes de date d'occurrence : « la perte de mémoire de l'existence du stockage peut être raisonnablement située au-delà de 500 ans. Cette valeur de 500 ans sera retenue comme date minimale d'occurrence d'une intrusion humaine ; »
- et en termes de caractéristiques des situations d'intrusion humaine retenues qui doivent être fondées sur des hypothèses pessimistes :
 - ✓ « l'existence du stockage et son emplacement sont oubliés ; »
 - ✓ « le niveau de technologie est le même qu'aujourd'hui. »

Les situations à envisager au titre de l'intrusion humaine dans le contexte d'un site argileux sont *a minima* les suivantes :

- « Forage exploratoire traversant un ouvrage de stockage. Une situation supposant un forage traversant le stockage avec extraction de carottes devra être retenu. L'exploitation de carottes constituées de déchets de haute activité donne lieu à une exposition externe qui sera évaluée en fonction du type d'examen effectué sur ces carottes » ;
- « Forage exploratoire abandonné et mal scellé traversant un ouvrage de stockage. Pour les sites sédimentaires, il faudra étudier les conséquences liées à la mise en communication d'aquifères ou entre un aquifère et les ouvrages de stockage » ;
- « Forage d'exploitation d'eau à usage alimentaire ou agricole dans un aquifère profond. Le caractère plausible d'un pompage d'exploitation d'eau à usage alimentaire ou agricole dans un aquifère profond sera précisé en fonction des ressources en eau. L'influence du pompage sur les écoulements sera appréciée en vue de l'évaluation des expositions individuelles. »

L'intrusion humaine pour les organisations internationales

Selon l'OCDE-AEN [Future Human Actions at Disposal Sites - Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories - OECD - NEA - 1995 (ISBN 92-64-14372-6 (66 95 04 1) NC)], les « activités humaines futures » désignent les actions réalisées après la fermeture du stockage qui ont le potentiel de perturber ou d'altérer significativement la capacité des barrières naturelles ou ouvragées participant au confinement des déchets radioactifs. Pour l'AIEA [Glossaire de sûreté de l'AIEA - Terminologie employée en sûreté nucléaire et en radioprotection - AIEA - Édition 2007], seules les activités humaines ayant un impact direct sur le stockage doivent être considérées comme des intrusions humaines.

S'agissant du caractère intentionnel ou non de l'intrusion, l'OCDE-AEN distingue :

- des intrusions réalisées par inadvertance pour lesquelles le stockage et/ou le système de barrière associé sont accidentellement pénétrés du fait que leur localisation est inconnue, que leur rôle est oublié ou que les conséquences de l'intrusion sont méconnues ;
- des intrusions intentionnelles lorsque les personnes responsables de l'intrusion ont connaissance de la présence des déchets ou des conséquences possibles de la perturbation sur le fonctionnement du stockage.

Le groupe de travail HIDRA de l'AIEA (Human Intrusion, in the context of Disposal of RAdioactive waste) en cours est l'occasion de mettre l'accent sur la distinction entre les « intrusions humaines » et les « actions humaines ». Il y a également été insisté sur la nécessité d'accompagner le traitement des scénarios d'intrusion humaine d'explications détaillées concernant l'éventuel cumul d'événements peu vraisemblables que certains d'entre eux présupposent. Il convient enfin de rappeler que le principe de concentration et d'isolation des déchets qui sous-tend et justifie les projets de stockages profonds a pour conséquence inéluctable le risque d'expositions importantes lorsqu'un contact avec les déchets se produit. La profondeur et le contexte géologique sont des éléments essentiels de réduction de la vraisemblance des tels événements.

Conformément au guide ASN-2008, ces considérations ne dispensent pas d'évaluations des situations d'intrusion humaine involontaire. Elles incitent à distinguer les effets immédiats éventuels pour les opérateurs à l'origine de l'intrusion d'une part (cas de l'impact sur un foreur), et les conséquences sur le fonctionnement du stockage et les impacts susceptibles d'être induits sur le long terme d'autre part (cas du forage abandonné).

Annexe 12 : Liste des radionucléides retenus pour le calcul des scénarios d'intrusion (période supérieure à 20 ans)

RN	Période (ans)
Be10	1.60E+06
C14	5.70E+03
Al26	7.17E+05
Si32	1.32E+02
Cl36	3.01E+05
Ca41	1.03E+05
Ti44	6.00E+01
Mn53	3.68E+06
Fe60	1.50E+06
Ni59	7.60E+04
Ni63	1.01E+02
Se79	3.77E+05
Kr81	2.10E+05
Rb87	4.81E+10
Sr90	2.88E+01
Zr93	1.53E+06
Nb91	6.80E+02
Nb92	3.50E+07
Nb94	2.00E+04
Mo93	4.00E+03
Tc97	2.60E+06
Tc98	4.20E+06
Tc99	2.14E+05
Pd107	6.50E+06
Ag108m	4.18E+02
Sn121m	5.50E+01
Sn126	2.30E+05
I129	1.61E+07

RN	Période (ans)
Cs135	2.30E+06
Cs137	3.00E+01
La137	6.00E+04
Sm146	1.00E+08
Sm151	9.00E+01
Eu150	3.64E+01
Gd148	7.46E+01
Gd150	1.82E+06
Tb157	9.90E+01
Tb158	1.80E+02
Dy154	3.00E+06
Ho163	4.57E+03
Ho166m	1.20E+03
Lu176	4.00E+10
Hf178n	3.10E+01
Hf182	9.00E+06
Re186m	1.90E+05
Ir192n	2.41E+02
Pt193	5.00E+01
Hg194	4.44E+02
Pb202	5.30E+04
Pb205	1.53E+07
Bi207	3.18E+01
Bi208	3.68E+05
Bi210m	3.00E+06
Po209	1.02E+02
Ra226	1.60E+03
Th229	7.34E+03

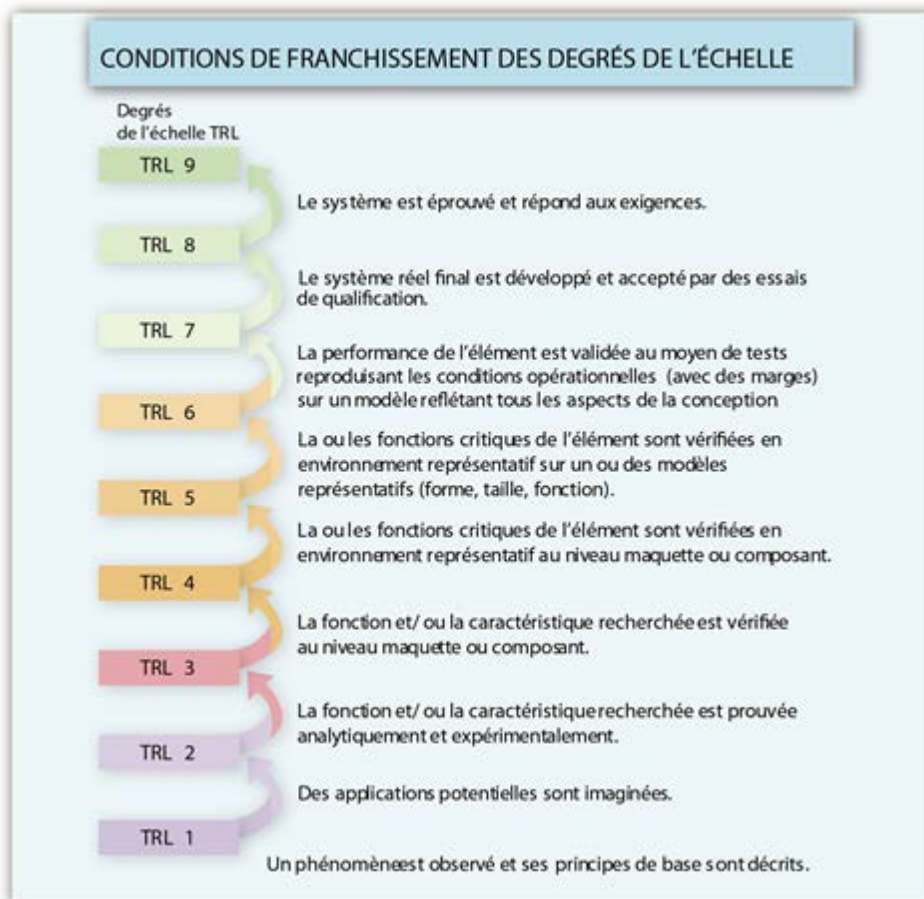
RN	Période (ans)
Th230	7.54E+04
Th232	1.41E+10
Pa231	3.28E+04
U232	6.98E+01
U233	1.59E+05
U234	2.46E+05
U235	7.04E+08
U236	2.37E+07
U238	4.47E+09
Np236	1.52E+05
Np237	2.14E+06
Pu238	8.77E+01
Pu239	2.41E+04
Pu240	6.56E+03
Pu242	3.74E+05
Pu244	8.00E+07
Am241	4.33E+02
Am242m	1.41E+02
Am243	7.36E+03
Cm243	3.00E+01
Cm245	8.50E+03
Cm246	4.73E+03
Cm247	1.60E+07
Cm248	3.40E+05
Cm250	8.00E+03
Bk247	1.38E+03
Cf249	3.51E+02
Cf251	8.98E+02

Chaînes de filiation considérées

Zr93→Nb93m,
 4N (Cm244→Pu240→U236→Th232→Th228→Ra228),
 4N+1 (Cm245→Pu241→Am241→Np237→U233→Th229),
 4N+2 (Cm246→Pu242→U238→U234→Th230→Ra226→Pb210)
 4N+3 (Am243→Pu239→U235→Pa231→Ac227).

ANNEXES DU VOLUME IV

Annexe 1 : Échelle TRL (Technology Readiness Level) pour l'évaluation du niveau de maturité technologique d'un élément



Annexe 2 : Exemple d'application au conteneur de stockage HA

<p align="center">Échelle TRL appliquée à Cigéo : cas des conteneurs de stockage HA <i>(les fonctions critiques sont « le retard de l'arrivée d'eau sur les déchets » et « l'aptitude à la manutention horizontale »)</i></p>	
Après atteinte du TRL 9	<p>Cigéo est en exploitation industrielle courante.</p> <p>Les conteneurs HA industriels sont reçus, soudés pour constituer les colis de stockage (CS) et stockés au rythme nominal. Des rapports d'exploitation sont émis périodiquement.</p>
Après atteinte du TRL 8 et pour atteindre le TRL 9	<p>Cigéo est en phase industrielle pilote. De premiers colis de déchets réels sont reçus. L'exploitant procède à des essais et à des vérifications des procédures d'exploitation en conditions actives.</p> <p>Des conteneurs de stockage HA industriels sont reçus et soudés par le poste industriel pour constituer des colis de stockage actifs qui sont mis en stockage. Le respect des exigences techniques spécifiées est vérifié.</p>
Après atteinte du TRL 7 et pour atteindre le TR L8	<p>Suite à sa construction, l'installation est en phase industrielle pilote. Son exploitant procède à des essais et à des vérifications des procédures d'exploitation dans des conditions inactives.</p> <p>De premiers conteneurs HA industriels sont reçus et soudés par le poste industriel pour constituer des colis de stockage inactifs qui sont mis en stockage.</p>
Après atteinte du TRL 6 et pour atteindre le TRL 7	<p>L'installation Cigéo n'est pas encore construite.</p> <p>Plusieurs exemplaires identiques d'un modèle de conteneur de stockage HA ayant les mêmes caractéristiques que le conteneur de stockage HA industriel prévu (type(s) de matériau, taille, masse, épaisseur, forme, présence d'un objet simulant un conteneur de verre...), sont produits, assemblés et soudés par des procédés identiques à ceux qui seront industrialisés (même matériau, même technologie de soudure...); les futures conditions industrielles de production sont reproduites ou prises en compte au mieux (température, irradiation...).</p> <p>Les colis de stockage HA produits sont soumis à des essais de caractérisations (analyse non destructives et destructives) et des essais de résistance/durabilité face à des sollicitations (chute, incendie, corrosion...), reproduisant et pour certaines dépassant les conditions opérationnelles envisagées en exploitation et pendant plusieurs siècles après fermeture, en vue de valider leurs performances. Des modélisations sont menées en parallèle afin de s'assurer de la capacité des modèles à reproduire les comportements observés et à évaluer les comportements dans des conditions autres afin notamment de définir un domaine de fonctionnement aux limites.</p>
Après atteinte du TRL 5 et pour atteindre le TRL 6 <i>Phase en cours du projet Cigéo</i>	<p>Plusieurs exemplaires, éventuellement de différents modèles de conteneur de stockage HA ayant des caractéristiques représentatives de celles des conteneurs de stockage HA industriels envisagés (forme, taille, fonction, matériau) sont produits, assemblés et soudés. Ces modèles sont soumis à des caractérisations (destructives et non destructives), tests et simulations permettant d'évaluer leurs fonctions critiques dans des conditions d'environnement représentatives du stockage (température, environnement argileux ou cimentaire, sollicitations mécaniques, conditions redox...).</p>
Après atteinte du TRL 4 et pour atteindre le TRL 5	<p>Des exemplaires de maquettes de conteneurs de stockage HA (pas nécessairement en « grandeur réelle » ou entièrement fonctionnels, mais autant que nécessaire représentatifs des conteneurs de stockage HA industriels envisagés) ou de composants de conteneur de stockage HA (éprouvettes, pièces entières ou parties de couvercles, corps, zones soudées, patins...) sont utilisés pour évaluer les fonctions critiques des conteneurs de stockage HA industriels dans des conditions d'environnement représentatives du stockage. Ces maquettes ou composants sont soumis à des essais de caractérisation (destructifs et non destructifs) et des tests de résistance/durabilité. Des modélisations sont menées en parallèle afin de s'assurer de la capacité des modèles à reproduire les comportements observés et à évaluer les comportements dans des conditions autres, afin notamment de définir un domaine de fonctionnement aux limites</p>
Après atteinte du TRL 3 et pour atteindre le TRL 4	<p>Un ou des exemplaires de maquettes de conteneurs de stockage HA ou de composants de conteneurs de stockage HA sont produits afin d'établir la performance de base. La vérification limitée à des conditions de laboratoire et par simulation est peu représentative.</p>

Annexe 3 : Tableau de correspondance : fonctions de sûreté après fermeture/composants du système de stockage

Composants du système de stockage		Formation Hôte	Architecture			Composants Ouvragés HA			Composants ouvragés MA-VL			Scellements	
		Callovo-Oxfordien	Liaisons surface-fond (LS)	Quartier(s)	de liaisons entre quartiers	Alvéole HA	Colis primaire HA	Conteneur de stockage HA	Alvéole MA-VL	Colis primaire MA-VL	Conteneur de stockage MA-VL	Scellement s LSF	Scellement s fond
Fonctions de sûreté après fermeture													
Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines		(1)											
S'opposer à la circulation d'eau													
	Limiter le flux d'eau provenant des formations sus-jacentes traversées par les liaisons surface-fond et du Callovo-Oxfordien											(22)	
	Limiter le flux d'eau entre le stockage et les formations sus-jacentes (via les liaisons surface-fond)	(2)	(6)									(22)	(23)
	Limiter les vitesses de circulation de l'eau au sein du stockage	(2)	(6)	(7)	(12)							(22)	(23)
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage													
	Protéger les déchets de l'eau							(19)		(20)			
	Limiter la mise en solution des radionucléides	(3)		(7) (8)		(15)	(18)	(19)	(15)	(20) (15)	(21)		
	Limiter la mobilité des RN	(3) (4)				(16)			(13)	(20)			
Retarder et atténuer la migration des radionucléides													
	Retarder et atténuer le flux longitudinal des radionucléides dans les ouvrages				(13)	(13) (15)			(13) (15)				(24)
	Retarder et atténuer la migration des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien	(3) (4) (5)	(6)	(9) (14)	(14)	(9)			(15)				
	Préserver la capacité naturelle de dispersion et de dilution des formations encaissantes											(22)	
Préservation des propriétés favorables du COX													
	Maintien de la température au sein du stockage et du Callovo-Oxfordien dans un domaine maîtrisé au plan phénoménologique			(10)		(16)							
	Limitation de (l'extension de) l'endommagement des argilites autour du stockage dans le temps				(11) (14)	(17)			(17)			(22)	(23)
	Préservation des gardes de Callovo-Oxfordien sain suffisamment grandes			(11) (14)	(11) (14)	(11) (14)			(11) (14)				

- (1) Profondeur géodynamique faible et homogène
- (2) Très faible perméabilité et gradients hydrauliques verticaux faibles
- (3) Chimie des eaux du Callovo-Oxfordien
- (4) Capacité de rétention, transfert dominant par diffusion
- (5) Transfert dominant par diffusion et épaisseur associée
- (6) Regroupement des liaisons surface-fond
- (7) Quartier(s) borgne(s)
- (8) Distance entre quartiers exothermiques isolés des autres quartiers
- (9) Architecture « planaire » des quartiers
- (10) Entraxes entre alvéoles
- (11) Remblaiement pour limiter le volume de vide résiduel
- (12) Remblai et longueur
- (13) Longueur
- (14) Implantation dans le Callovo-Oxfordien
- (15) Environnement chimique
- (16) Intercalaires éventuels entre colis pour alvéoles HA1/HA2
- (17) Limitation des vides résiduels
- (18) Verre nucléaire
- (19) Épaisseur et nature du matériau
- (20) Matrice selon les familles
- (21) Géométrie maintenue sur une durée limitée pour enrobés bitumineux
- (22) Noyau en argile gonflante et absence de ZFC
- (23) Noyau argileux et ZFC cicatrisée
- (24) Orientation selon la contrainte horizontale majeure

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire. (2008). Guide de l'ASN. 32 p.
- 2 Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. (1992). Journal Officiel de la République Française. Lois et décrets, n°1, pp.10.
- 3 RFS n°III.2.f du 10 juin 1991 - Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage. (1991). Autorité de Sûreté Nucléaire. RFS III.2.f.
- 4 Dossier 2005. Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Résultats et perspectives. Andra. (2005). Andra. Les rapports n°265. Rapport n° DCOM/13-0225. 40 p.
- 5 Loi n° 2006-739 du 28 Juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. (2006). Journal Officiel. Lois et Décrets, n°93, pp.9721.
- 6 Délibération du conseil d'administration de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs du 5 mai 2014 relative aux suites à donner au débat public sur le projet Cigéo. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2014). Journal Officiel. Lois et décrets, n°108, pp.7851-7854.
- 7 Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (DOS-Expl). Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOASR10000150060.
- 8 Proposition de plan directeur pour l'exploitation (PDE). Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOASDR0000150063.
- 9 Dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec). Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOARV00000150059.
- 10 Adaptabilité de Cigéo au stockage éventuel de combustibles Andra. (2012). Note technique n° CGTEFNTEAMOAMT07000120116.
- 11 Adaptabilité de Cigéo pour le stockage des déchets en "réserves". Andra. (2015). Note technique n° CGNTADPG150006.
- 12 Esquisse de la notice des capacités techniques de l'exploitant. Andra. (2015). Note technique n° CGTEDNTEAMOASYN0000150064.
- 13 Avis n° 2010-AV-0084 du 5 janvier 2010 de l'ASN sur le dossier de l'agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA) relatif à la proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface pour un stockage réversible en formation géologique profonde. Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) (2010).
- 14 Loi n°2006-686 du 13 juin 2006 modifiée relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. Version consolidée au 12 juillet 2014. (2006).
- 15 Arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. Version consolidée au 05 juillet 2013. (2012).
- 16 Biosphère. Démarche de choix et de description d'une ou plusieurs biosphère(s). Andra. (2009). Transparent n° SURTRASSN090025.
- 17 NEA IGSC Scenario Development Workshop, 1-3 June 2015, Issy-les-Moulineaux, France (En cours de publication). (2016). OCDE.

- 18 Dossier ""projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde -maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo". Niel, J.C. Autorité de Sûreté Nucléaire. (2015). Lettre de l'ASN du 7 avril n°CODEP-DRC-2015-004834.
- 19 Référentiel du site Meuse/Haute-Marne - Présentation générale. Andra. (2012). Rapport n° DRPASMGI20032.
- 20 Référentiel du site Meuse/Haute-Marne. Tome 1. Le site de Meuse/Haute-Marne : histoire géologique et état actuel. Andra. (2012). Rapport n° DRPASMGI20032.
- 21 Référentiel du site Meuse/Haute-Marne. Tome 2 : L'évolution naturelle du site de Meuse/Haute-Marne. Andra. (2012). Rapport n° DRPASMGI20032.
- 22 L'aléa sismique pour un stockage géologique implanté sur la ZIRA, Site de Meuse / Haute-Marne. Bruhlet, J., Dubreuilh, P., Ego, F., Lebon, P. Andra. (2013). Note technique n° CGNTASMI20018.
- 23 Comportement des déchets en stockage. Modèles de relâchement des radionucléides pour les différentes familles de colis. Schumacher, S., Deydier, V., Martin, C., Ricard, D. Andra. (2013). Note technique n° CGNTASMI30021.
- 24 Modèles de relâchement retenus pour les déchets HA et MA-VL vitrifiés pour les évaluations de sûreté après fermeture de Cigéo. Andra. (2014). Note technique n° SURNTASAF140024.
- 25 Modèles de relâchement retenus pour l'évaluation de sûreté après fermeture. Andra. (2014). Note technique n° SURNTASAF140003.
- 26 Arrêté du 29 septembre 2005 relatif l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Version consolidée au 28 octobre 2015. (2015).
- 27 Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Etat de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base des indicateurs de durabilité. (2004). Association Française de Génie Civil, Documents scientifiques et techniques. 252 p.
- 28 Plan de développement des composants du projet Cigéo - Déclinaison suivant l'échelle TRL (ISO 16290:2013). Andra. (2014). Plan de Déroulement, de Développement n° CGPDDADPG140031.
- 29 Exigences applicables - Projet Cigéo. Andra. (2014). Spécifications n° CIGEOSPADPG110020.
- 30 Code l'environnement. Partie législative. Livre Ier : Dispositions communes. Titre II : Information et participation des citoyens. Chapitre V : Autres modes d'information. Section 1 : Dispositions relatives aux activités autres que les activités nucléaires. (article L125-1 à L125-9). (2015). Code l'environnement,
- 31 Code l'environnement. Partie législative. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Titre IV : Déchets. Chapitre II : Dispositions particulières à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs (Article L542-1 à L542-14). (2015).
- 32 Code l'environnement. Partie législative. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Titre IX : La sécurité nucléaire et les installations nucléaires de base. Chapitre Ier : Dispositions générales relatives à la sécurité nucléaire (Articles L591-1 à 591-5). (2015).
- 33 Code l'environnement. Partie législative. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Titre IX : La sécurité nucléaire et les installations nucléaires de base. Chapitre III : Installations nucléaires de base (Articles L593-1 à L593-38). (2015).
- 34 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. Version consolidée au 27 février 2014. (2007).

- 35 Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. Ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées (2013). Journal Officiel de la République Française, n°262, pp.58003-58068.
- 36 Arrêté du 9 août 2013 portant homologation de la décision n° 2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base. Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie (2013). Journal Officiel de République Française, n°193, pp.14278.
- 37 Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels v2.2. (Wgwd), W.G.O.W.a.D. Western European Nuclear Regulators Association (WENRA). (2014). 81 p.
- 38 Fundamental safety principles. Safety fundamentals. IAEA. (2006). IAEA safety standards series n°SF-1. 37 p.
- 39 Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements. IAEA. (2011). IAEA Safety Standards Series n°SSR 5. 62 p.
- 40 The management system for facilities and activities. Safety Requirements. IAEA. (2006). IAEA Safety Standards Series n°GS-R-3. 27 p.
- 41 Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. Specific Safety Guide. IAEA. (2014). IAEA Safety Standards Series n°SSG-31. 96 p.
- 42 The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific safety guide. IAEA. (2012). IAEA Safety Standards Series n°SSG-23. 140 p.
- 43 Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide. IAEA. (2011). IAEA Safety Standards Series n°SSG 14. 104 p.
- 44 The management system for the disposal of radioactive waste. Safety guide. IAEA. (2008). IAEA safety standards series n°GS-G-3.4. 85 p.
- 45 Defence in depth in nuclear safety : INSAG-10. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. International Atomic Energy Agency. (1996). IAEA. INSAG series n°10. n° STI/PUB/1013. 37 p.
- 46 ICRP Publication 122 : Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste (2013) 42,
- 47 ICRP publication 103 : The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection (2008) *Annals of the ICRP*, 37, (2-4), 330 p.
- 48 ICRP Report 101 : Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection : Broadening the Process (2006) *Annals of th ICRP*, 36, (3), 104 p.



AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS

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

www.andra.fr